

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto

Puunjalostustekniikan laitos

Juuso Äikäs

**KUVALÄHTEIDEN KOLORIMETRINEN VÄRIKALIBROINTI  
ERI VALAISTUSOLOISSA**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 8.9.1993.

Työn valvoja

Prof. Hannu Saarelma

Työn ohjaaja

Tekn.lis Caj Södergård



Tekijä, työn nimi

Juuso Äikäs

Kuvalähteiden kolorimetrinen värikalibrointi eri valaistusoloissa

Päivämäärä:8.9.1993

Sivumäärä:36

Osasto, laitos, professuuri

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto, puunjalostustekniikan laitos, graafinen tekniikka

Työn valvoja

Professori Hannu Saarela

Työn ohjaaja

Tekn.lis. Caj Södergård

Työssä on tutkittu CCD-tekniikkaan pohjautuvien kuvalähteiden kolorimetristä värikalibrointia. Menetelmää tullaan soveltamaan konenäköön perustuvassa painojäljen jatkuvatoimisessa valvonnassa. Kuvan syöttölaitteina käytettiin DTP-skanneria, 3-CCD kameraa sekä SVHS-kameranauhuria.

Kolorimetrisesti määritetty testikuva syötettiin kuhunkin systeemiin. Muunnos kolorimetrisen ja laiteriippuvan muodon välillä määritettiin polynomiregression avulla. Värierot testikuvan ja kalibroitujen kuvien välillä laskettiin CIELAB-avaruudessa.

Polynomiregressio sopii skannerin kalibrointiin hyvin, koska skannerin valaistusolosuhteet pysyvät vakiona pitkiä aikoja. Videokameroiden kalibroinnissa ongelmana on valaistuksen vaihtelevuus. Laadukkaalla videokameralla päästään kuitenkin saman suuruusluokan tarkkuuksiin kuin skannerilla.

Polynomiregressio osoittautui käyttökelpoiseksi värikalibrointimenetelmäksi, mikäli kalibroitava laite toimii vakiolisessa valaistuksessa ja mitattava väriavaruus ei ole kovin suuri.

Menetelmä sopii parhaiten värimittauksiin, joissa mitattavat väriavaruudet ovat pieniä. Esimerkiksi värimittaus, joka kohdistuu sanomalehden värimittaukseen laadukkaalla 3CCD-kameralla vakiolisessa ja riittävässä valaistuksessa, on menetelmän kannalta sopiva.



## ALKUSANAT

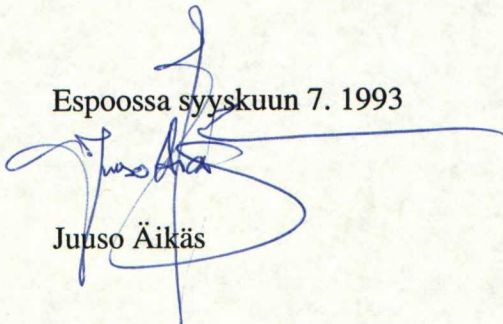
Tämä diplomityö on tehty Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen Graafisessa laboratoriossa osana TEKESin rahoittamaa ARGUS-projektia.

Esitän parhaimmat kiitokseni valvojalleni professori Hannu Saarelmalle saamistani neuvoista ja opastuksesta.

Suurimmat kiitokseni saa työni ohjaaja, tekn.lis. Caj Södergård. Hänen ohjaukseen oli diplomityön tekeminen mielenkiintoista ja mukavaa. Ilman tekn.yo Virpi Leikolan seuraa työn tekeminen olisi ollut väritöntä, ilman tekn.yo Marjo Lehtovaaraa en olisi tätä työtä edes aloittanut, joten suurkiitos heille. Haluan lisäksi kiittää tekn.lis. Ilkka Yläkoskea, jonka kannustavat ja innostavat neuvot ja kommentit antoivat oikea-aikaista ja -voimaista potkua.

Rakkaimmat kiitokseni tulevalle vaimolleni Niina Ebelingille, tuesta ja ymmärryksestä.

Espoossa syyskuun 7. 1993

A large, stylized handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Jussi Äikäs'. The signature is written over the printed name and date.

Jussi Äikäs

## Sisällysluettelo

1. Johdanto	3
2. Värinäkeminen	3
2.1 Silmän rakenne	3
2.2 Kolorimetrinen värin esitys	5
3. Värikuvien syöttölaitteet	9
4. Valonlähteet	12
5. Testikuva	14
6. Testatut laitteistot ja kuvausolosuhteet	16
6.1 DTP-skanneri	16
6.2 ARGUS-mittausyksikkö	17
6.3 Super-VHS kameranauhuri	18
7. Käytetyt menetelmät	18
7.1 Kolorimetrinen mittaus	18
7.2 Harmaasävykorjaus	18
7.3 RGB→XYZ-muunnos usean selittäjän regression avulla	19
8. Tulokset	21
8.1 Sharp JX-450 tasoskanneri	22
8.2 ARGUS-mittausyksikkö	26
8.3 Panasonic MS-1 SuperVHS videokamera	30
9. Vertailut kirjallisuuden tuloksiin	34
10. Johtopäätökset	35



## 1. JOHDANTO

CCD-tekniikkaan perustuvien skannereiden ja videokameroiden käyttö värinmittaukseen on uusi ja kasvava alue, jossa on muutamia täysin tavanomaisesta kuvankäsittelystä poikkeavia piirteitä.

Hyvän kolorimetrin tarkkuus on 1/10 000 eli noin 0,01 yksikköä CIE XYZ-koordinaatistossa. Skannereiden ja kuvansiieppauskorttien erottelukyky on tavallisimmin 8 bittiä eli 1/256 yksikköä. Videokamera pystyy siten tuottamaan miljoonia 8 bittisiä numeroita sekunnissa, joten sopivalla kuvankäsittelyllä voidaan sen toistettavuutta ja luotettavuutta parantaa. Tämä avaa mahdollisuuksia videokameran käyttöön jatkuvatoimisessa värinmittauksessa.

VTT:n Graafisessa laboratoriossa on kehitetty CIM-pohjaista, kuva-analyysiin perustuvaa painoprosessin ohjausjärjestelmää. Tämän ARGUS-projektin tarkoituksena on nostaa väripainatuksen laatua konenäön avulla. Järjestelmä viestittää väritietoja laiteriippumattomassa muodossa kuvaoriginaalista painatuksen valvontamoduuliin saakka.

Tämän työn tarkoituksena on kehittää värikuvalähteiden kolorimetriseen, laitteistoriippumattomaan kalibrointiin yleistä menetelmää sekä soveltaa ARGUS-järjestelmän kuvalähteisiin ja kuvaustilanteisiin. Järjestelmässä 3-CCD videokamera valvoo painettua rainaa stroboskoopisalaman valaistuksessa. Jotta sivun väriinformaatiota voitaisiin analysoida täytyy kameran olla kalibroitu. Kuvat syötetään järjestelmään DTP-skannerilla, jonka kalibrointi on myös tarpeen, koska tällöin järjestelmän värikommunikointi voi toimia laitteistoriippumattomasti. Lisäksi kalibroidaan Super-VHS kamera vertailukohdaksi muihin kuvalähteisiin.

## 2. VÄRINÄKEMINEN

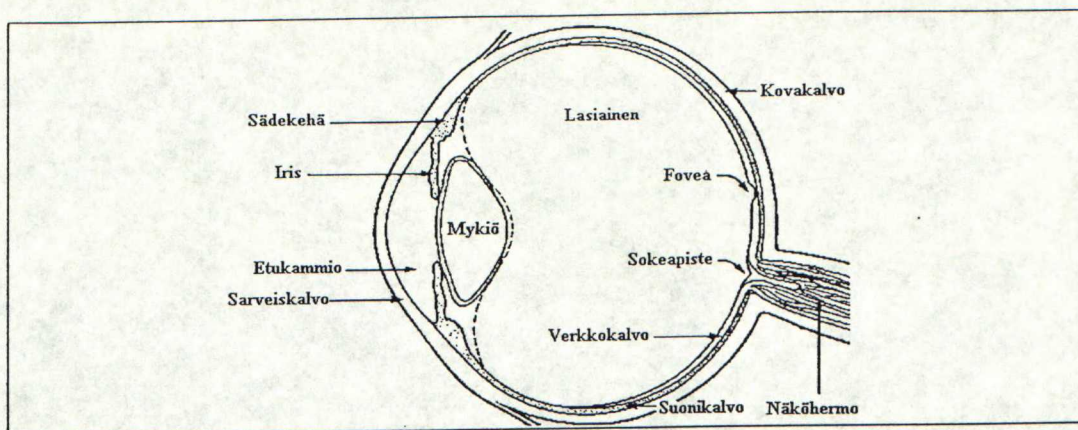
Värihavainto koostuu kolmesta tekijästä: Valolähteestä, kohteesta ja havainnoitsijasta. Värihavainto syntyy, kun valo heijastuu kohteesta tai läpäisee kohteen, jota havainnoitsija katsoo. Painetulla kuvalla pyritään katsojalle tuottamaan kohdetta visuaalisesti vastaava havainto.

Tietynlainen spektraalijakauma tuottaa normaalinäköisellä ihmisellä tietyn värisen havainnon. Toisaalta tietty väri voidaan tuottaa usealla eri spektraalijakaumalla. Värinäkeminen on psykofyysinen ominaisuus, eikä sitä voida täydellisesti koskaan mallittaa.

### 2.1 Silmän rakenne

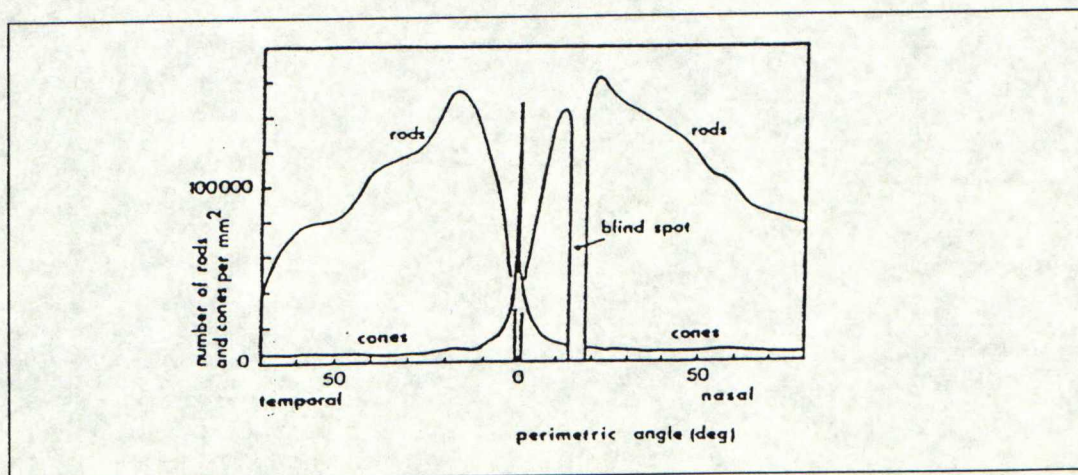
Silmä on pallonmuotoinen elin, jonka säde on noin 12mm. Suurin osa värinäkemiseen vaikuttavista ilmiöistä tapahtuu verkkokalvon läheisyydessä. Kuvassa 1 on esitetty silmän rakenne ja nimetty se yleisimmät osat.





**Kuva 1.** Poikkileikkaus silmän rakenteesta /12,32,6/.

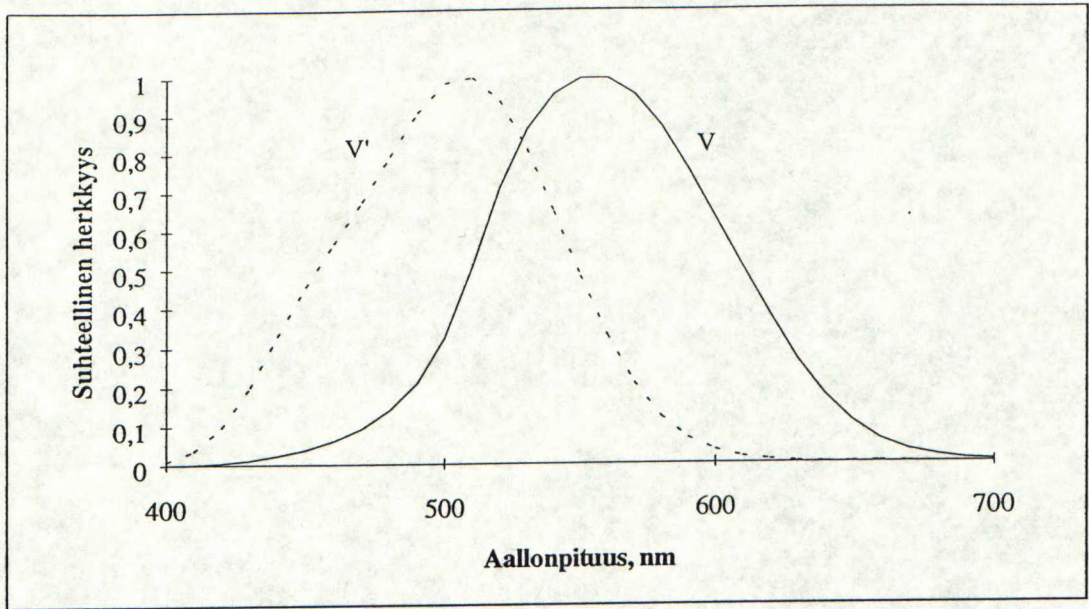
Iris säätelee mykiön läpi verkkokalvolle lankeavan valon määrää. Mykiön tehtävänä on mukauttaa silmä lähietäisyydelle, mutta se myös suodattaa lyhytaaltoista säteilyä. Verkkokalvo eli retina, joka koostuu monimutkaisesta valoherkkien solujen verkostosta, peittää silmän takaosan. Retinassa on hermosoluja kymmenessä tassa. Valonherkkiä soluja kutsutaan sauva- ja tappisoluiksi. Näiden jakaumat vaihtelevat verkkokalvon paikan funktiona, kuva 2.



**Kuva 2.** Tappi(cones)- ja sauvasolujen(rods) lukumäärä asteina foveasta /4/.

Retinan keskellä foveassa on pelkästään tappisoluja. Tapit toimivat keskinkertaisessa ja voimakkaassa valaistuksessa (fotooppinen näkö), sauvat hämärässä valossa (skotooppinen näkö). Tappisolut aistivat värejä, sauvat ainoastaan harmaasävyjä. Silmän spektraalinen kokonaisherkyys siirtyy valaistuksen muuttuessa kirkasta hämärään 555 nm:stä noin 510 nm:iin. Ilmiötä kutsutaan Purkinje-efektiksi, kuva 3.





**Kuva 3.** Skotooppisen V' ja fotooppisen V näön kokonaisherkkyydet /5/.

Tappien lukumäärä on noin 6,5-6,8 miljoonaa. Ne sisältävät kolmea erilaista pigmenttiä, joiden absorptiomaksimit ovat 440 nm, 535 nm ja 570 nm. Sauvasolut sijaitsevat n. 20° optisesta akselista ja niiden absorptiomaksimi on n. 507 nm /10/.

## 2.2 Kolorimetrinen värin esitys

Nykyaikainen kolorimetria perustuu suurelta osin ns. additiiviseen värien sekoitukseen ja vuodelta 1853 peräisin oleviin Grassmannin lakeihin. Additiivinen sekoitus tarkoittaa väristimulia, jonka säteilyenergiajakauma on ainakin joltain osaltaan muodostunut kahden tai useamman spektraalijakaumaltaan erilaisen stimulin summasta. Grassmannin lakien periaatteet voidaan esittää seuraavasti:

- Silmä voi erottaa vain kolmenlaisia värieroja (esim. värisävy, tummuus ja kylläisyyseroja).
- Jos kolmen stimulin additiivisessa sekoituksessa yksi stimuli muuttuu, niin myös sekoituksen väri muuttuu.
- Kaikki stimulit, joilla on sama väri käyttäytyvät samalla tavalla värejä additiivisesti sekoitettaessa riippumatta stimulien spektraalisesta säteilytehojakaumasta.

Grassmannin laeista seuraa nk. suhteellisuuslaki ja summautuvuuslaki.



#### *Suhteellisuuslaki:*

Jos stimuleilla **A** ja **B** on sama väri, niin myös stimuleilla **rA** ja **rB** on sama väri. Kerroin **r** on mikä tahansa positiivinen luku, jolla stimulin säteilyenergia kerrotaan suhteellisen spektraalijakauman pysyessä samana.

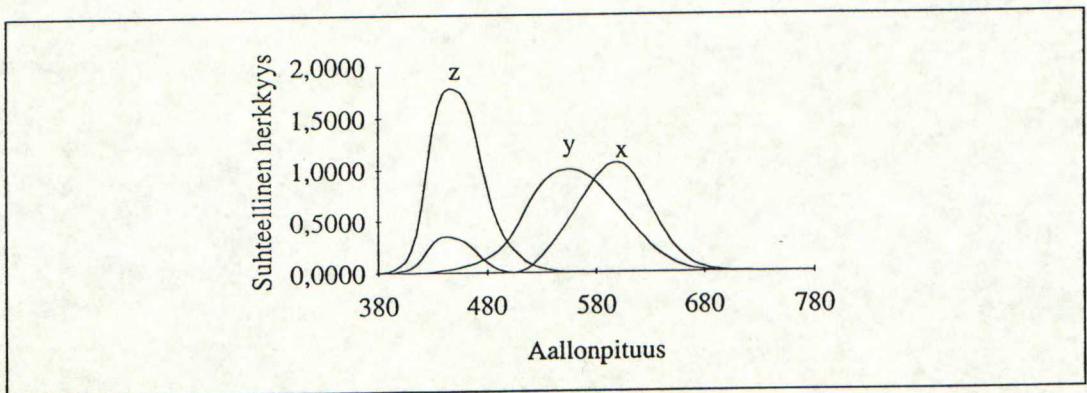
#### *Summautuvuuslaki:*

Jos stimuleilla **A** ja **B** on sama väri sekä lisäksi stimulat **C** ja **D** ovat väriltään samanlaisia, niin värejä sekoittamalla saaduilla stimuleilla (**A+C**) ja (**B+D**) on sama väri. Edelleen stimulat (**A+D**) ja (**B+C**) ovat saman värisiä.

Kolorimetrinen värin esitys tarkoittaa visuaalisen stimulin määrittämistä siten, että samanlaisissa tarkasteluolosuhteissa

- stimulat, joilla on sama numeerinen spesifikaatio, näyttävät samanlaisilta,
- stimuleilla, jotka näyttävät samanlaisilta, on sama numeerinen spesifikaatio ja
- ko. spesifikaatio on suoraan määritettävissä suoraan spesifikaation spektraalisesta säteilyjakaumasta.

Pohjan värin mittaukselle luo ihmissilmän kolmen eri värireseptorin väriavastemekanismit. Vuonna 1931 CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) määritteli nk. standardihavainnoitsijan silmän väriavasteet, kuva 4. Näiden kolmen käyrän avulla voidaan näköhavainnon spektraalinen käyrä muuttaa kolmeksi lukuarvoksi **X**, **Y** ja **Z**, jotka määrittelevät kohteen värin.



**Kuva 4.** 1931 Standardihavainnoitsijan värinsovitusfunktiot.

Nämä nk. tristimulusarvot **X**, **Y**, **Z** ovat käyttöarvoltaan rajoittuneita, koska ainoastaan **Y** korreloi luminanssin kanssa. **X** ja **Z** eivät korreloi minkään väriominaisuuden, kuten sävyn tai kylläisyyden, kanssa. Tämän vuoksi lasketaan tristimulusarvoista tristimuluskertoimet **x**, **y**, **z** kaavalla

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (1)$$

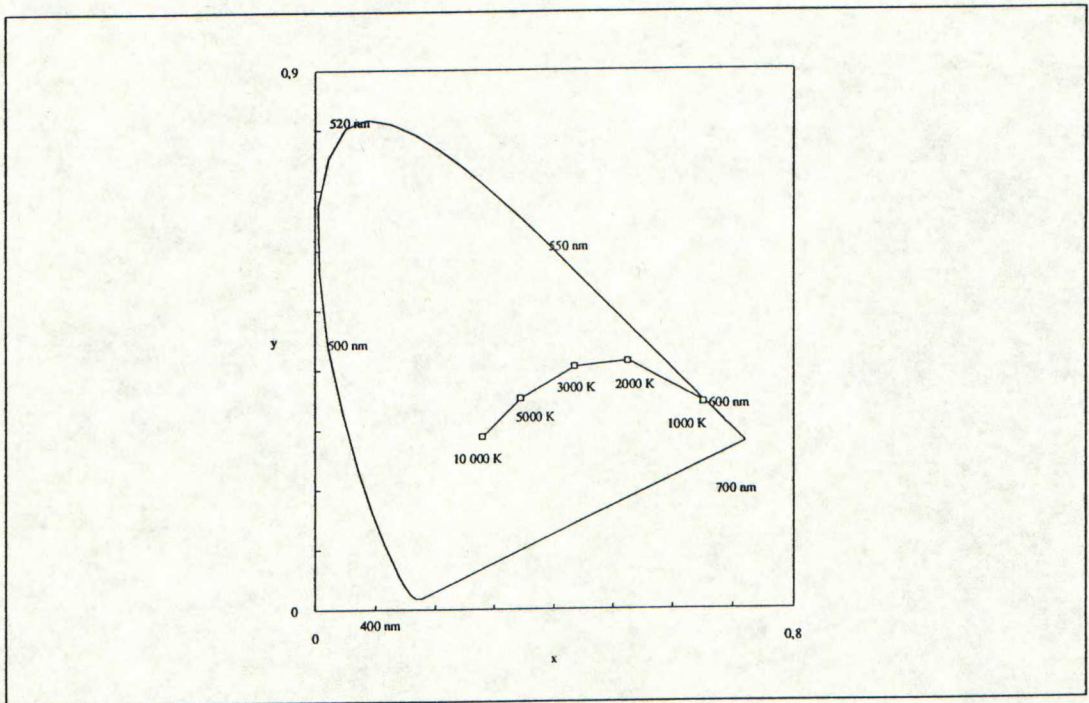


$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3)$$

Koska x:n, y:n ja z:n summa on 1, voidaan kromaattisuus määritellä x:n ja y:n avulla.

Kromaattisuutta visualisoidaan kromaattisuusdiagrammin avulla. Spektrin kylläisten värien tristimuluskertoimet muodostavat hevosenkengän muotoisen kuvion, jonka sisällä ovat kaikkien väristimulien kromaattisuuskertoimet, kuva 5.



**Kuva 5.** CIE x,y-kromaattisuusdiagrammi /6/.

CIE-koordinaatistosta on tehty lukuisia muunnelmia, joilla pyritään esittämään vä-  
rillisyyttä visuaalisesti lineaarisella tavalla.

Tunnetuimmat muunnokset ovat CIE L\*a\*b\*- ja CIE Luv-muunnokset. CIE L\*a\*b\*-koordinaatistoa käytetään painojäljen ja CIE Luv-koordinaatistoa näyttö-  
jen värillisyyden kuvaamisessa.

CIE L\*a\*b\* määritellään seuraavasti:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, \quad \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \quad (4)$$

$$L^* = 903,3 \left( \frac{Y}{Y_n} \right), \quad \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \quad (5)$$

$$a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (6)$$

$$b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right], \quad (7)$$

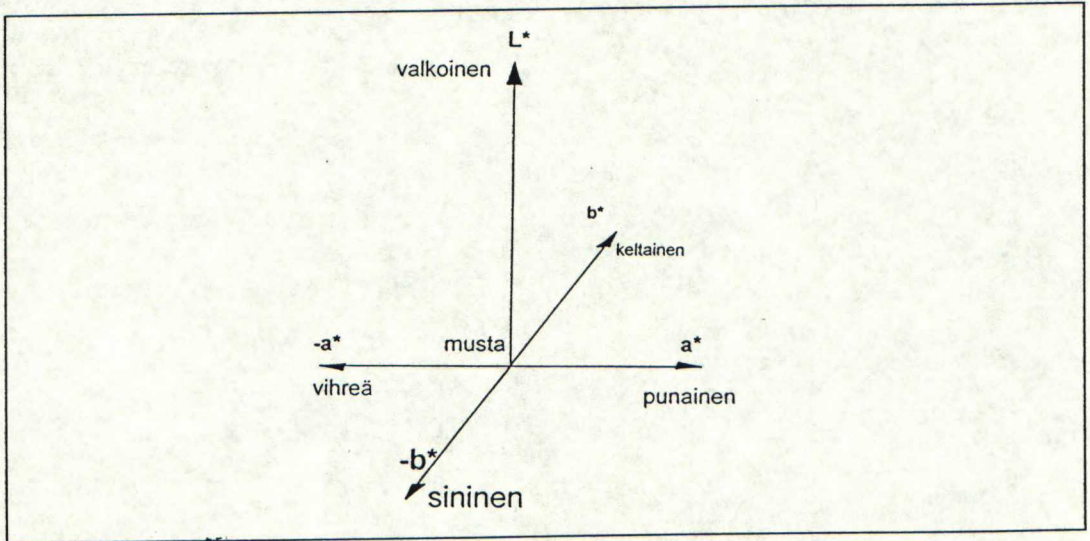
$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \begin{cases} \left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}}, & \frac{X}{X_n} \geq 0,008856 \\ 7,787\left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{16}{116}, & \frac{X}{X_n} < 0,008856 \end{cases}$$

$Y/Y_n$  ja  $Z/Z_n$  lasketaan vastaavasti. Alaindeksi  $n$  viittaa referenssipintaan tai valolähteeseen. Usein koordinaatit  $a^*$  ja  $b^*$  muunnetaan värillisyyttä kuvaavaksi koordinaateiksi, sävykulmaksi  $h^*$  ja kylläisyydeksi  $c^*$  seuraavasti:

$$h^* = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (8)$$

$$c^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (9)$$

Kuvassa 6 on esitetty CIE  $L^*a^*b^*$ -koordinaatisto.



**Kuva 6.** CIE  $L^*a^*b^*$  värikoordinaatisto.

CIELUV koordinaatit saadaan lausekkeista:

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (10)$$



$$v = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} = \frac{9y}{-2x+12y+3} \quad (11)$$

Väriero kahden värin välillä lasketaan  $L^*a^*b^*$ -koordinaatistossa kaavalla

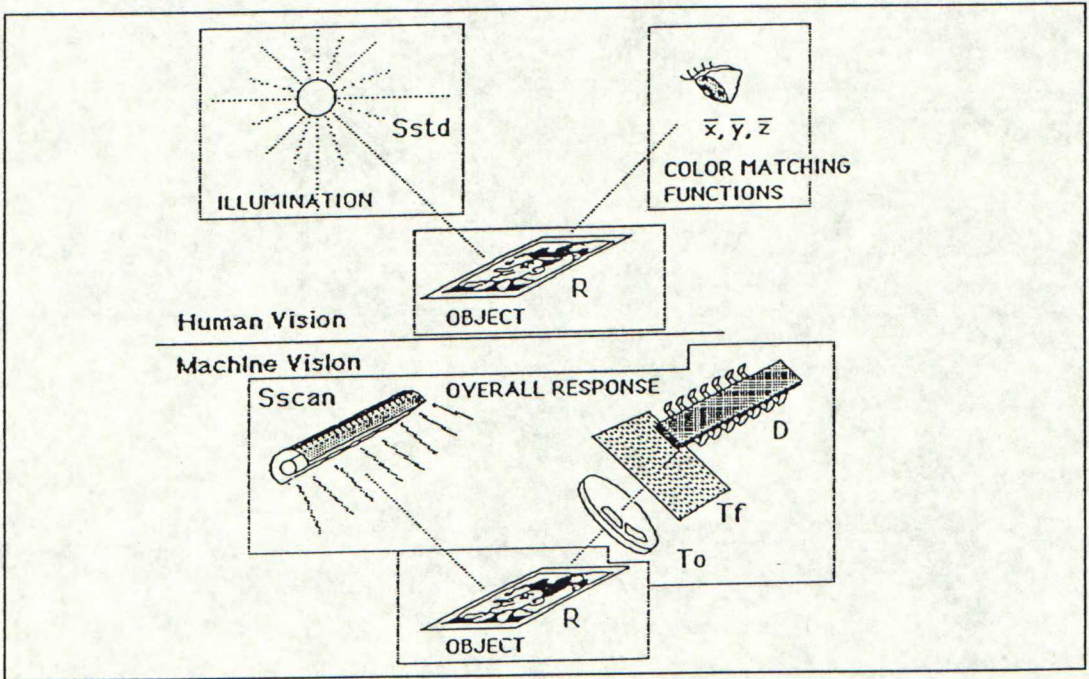
$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (12)$$

ja  $L^*u^*v^*$ -koordinaatistossa

$$\Delta E_{Luv} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (13)$$

### 3. VÄRIKUVIEN SYÖTTÖLAITTEET

Värikuvien syöttölaitteiden komponentit eivät ole kolorimetrisiä, joten ne havaitsevat eri tavalla kuin ihmissilmä. Kuvassa 6 on kuvattu ihmisen ja koneen näköjärjestelmän erot.



**Kuva 7.** Ihmisen ja koneen näköjärjestelmä /9/.

Syöttölaitteen osavärien vasteet määritellään seuraavasti /9/:

$$Re_R = \int S_{Scan_R}(\lambda) R(\lambda) T_O(\lambda) T_{f_R}(\lambda) D_R(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

$$Re_G = \int S_{Scan_G}(\lambda) R(\lambda) T_O(\lambda) T_{f_G}(\lambda) D_G(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

$$Re_B = \int S_{Scan_B}(\lambda) R(\lambda) T_O(\lambda) T_{f_B}(\lambda) D_B(\lambda) d\lambda \quad (16)$$



jossa	$D(\lambda)$	Detektorin herkkyys
	$S_{scan}(\lambda)$	Skannerin valonlähteen spektraalijakauma
	$T_O(\lambda)$	Optiikan spektraaliläpäisy
	$T_f(\lambda)$	Suotimien spektraaliläpäisy
	$R(\lambda)$	Kohteen spektraaliläpäisy/heijastus

Visuaalisen systeemin kokonaisherakkyys eli CIE tristimulusarvot määritellään /9/:

$$X = \int S_{std}(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda) \quad (17)$$

$$Y = \int S_{std}(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda) \quad (18)$$

$$Z = \int S_{std}(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda) \quad (19)$$

jossa	$S_{std}(\lambda)$	valaistuksen spektraalijakauma
	$x, y, z$	Standardihavainnoijan värinsovitusfunktiot, (kuva 4)
	$R(\lambda)$	Kohteen spektraaliläpäisy/heijastus

Jotta syöttölaite olisi kolorimetrinen, sen vasteet täytyy sovittaa värinsovitusfunktioiden ja valaistuksen tuloon. Ongelmana on, että sovitukset koskee ainoastaan yhtä valaistusta, joten vaihtelevassa valaistuksessa malli ei toimi. Lisäksi detektorien elementtien, suotimien ja valonlähteiden vaihtelut pienentävät sovituksen tarkkuutta.

Syöttölaitteet jaotellaan kolmeen ryhmään totetustekniikoiden pohjalta:

- puolijohdekamerat ja -skannerit
- putkikamerat
- valopisteskanerit

Lisäksi skannerit jaetaan rakenteen mukaisesti rumpu- ja tasoskannereihin. Tässä työssä tarkastellaan lähemmin vain CCD-tekniikkaan perustuvia laitteita.

Ensimmäiset puolijohdesensoreihin pohjautuvat värikamerat esiteltiin vuonna 1979. Kameroissa oli yksi kuvasensori, joihin oli integroitu raitasuodin. Ne olivat tarkoitettu kotivideokameroiksi. Nykyään puolijohdesensorien kuvalaatu on jo TV-lähettykseen vaadittavaa tasoa. Kameraputkiin verrattuna puolijohdesensoreilla on monia merkittäviä etuja. Ne ovat huomattavasti pienempiä ja keveämpiä, eivätkä vaadi kohdistuksen säätöä, niissä ei ole geometrisia vääristymiä eikä kuvapinnan palamisoongelmia. Ne käynnistyvät välittömästi, tehontarve on pieni ja niiden elinaika on pitkä. Puolijohdesensorien ongelmana ollut resoluutio tulee paranemaan tulevai-

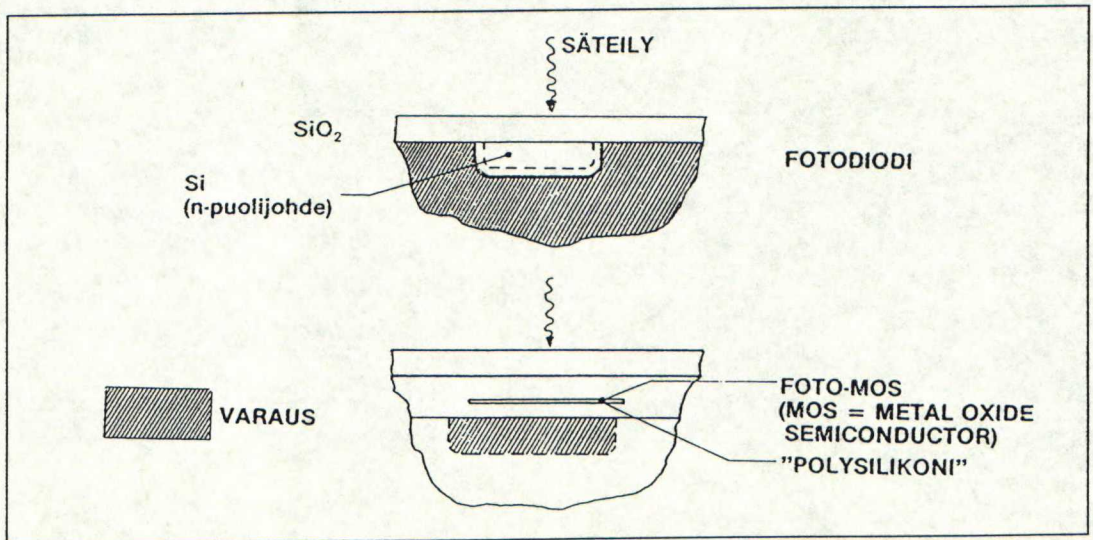


suudessa esisuodatusmenetelmien kehittyessä ja sensorin elementtien lukumäärän kasvaessa.

Puolijohdeskannerit tulivat markkinoille 1980-luvun puolivälissä, jolloin ne olivat vielä harmaasävyस्कannereita. Nykyään puolijohdeskannereita käytetään DTP-sovelluksissa graafisessa teollisuudessa sekä muissa dokumentteja valmistavissa yrityksissä. Niiden hinta on alhainen ja ne alkavat saavuttaa valomonistintekniikalla toimivien rumpuskannereiden laatutasoa.

Sensoritekniologia on tärkein osa syöttölaitteiden valmistuksessa. 1980-luvulla CCD-tekniikka kehittyi lähes samalle tasolle kuin aikaisemmin käytetyt valomonistinputket, joskin herkkyyseroja on erityisesti tummassa päässä. CCD-matriisien valmistus halpenee jatkuvasti ja ne tulevat syrjäyttämään muun sensoritekniologian lähes kokonaan /26/.

Puolijohdesensorit on mikropiirejä, joissa on  $n \times m$  valoherkää elementistä koostuva kuvapinta. Elementit ovat fotodiodeja tai foto-MOS-piirejä (MOS=MetalOxide Semiconductor). Ne toimivat kondensaattoreina, joihin kertyy paikallista valaistusta vastaava varaus, kuva 8.



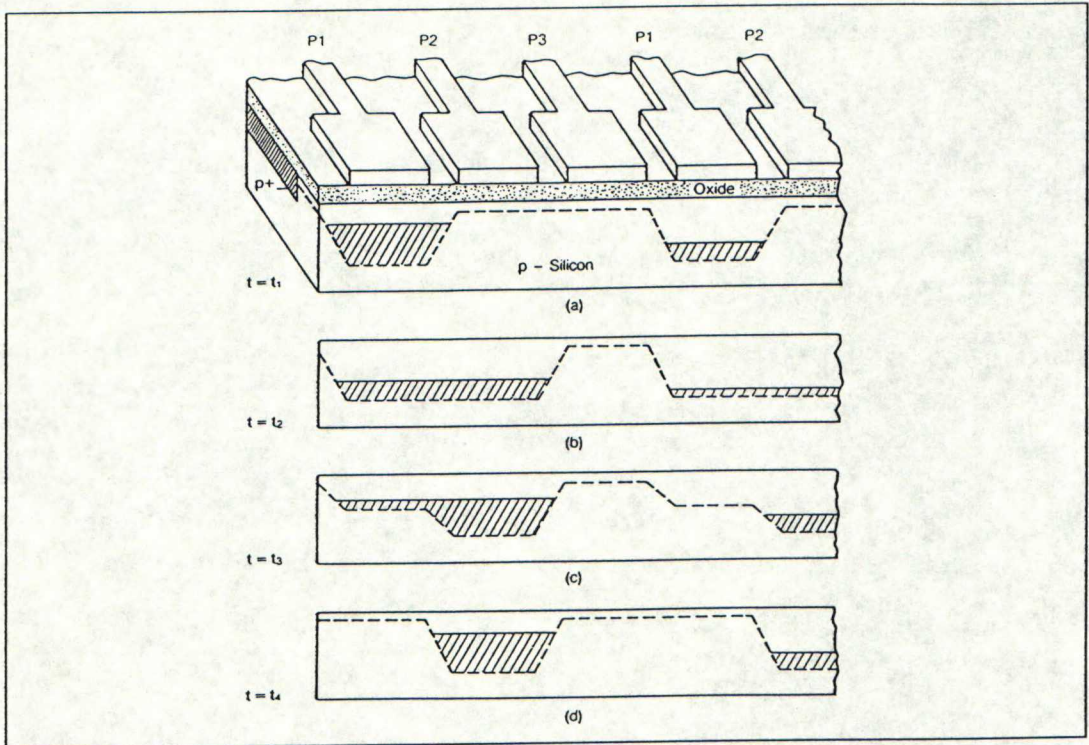
**Kuva 8.** Puolijohdematriisisensoreissa käytettyjä detektorielementtejä /31/.

Puolijohdesensorit on toteutettu joko MOS-kytkimen tai varaussiirtorekisterin (CCD) avulla.

MOS-kytkimessä fotelementit on kytketty ulostuloon MOS-FET-transistorien kautta siten, että vain yksi elementti kerrallaan on kytketty ulostuloon. Horisontaali- ja vertikaalirekisterit ohjaavat MOS-kytkimiä. Perusratkaisussa jokaisella fotelementillä on oma vertikaali-MOS-kytkin. Tällöin ongelmaksi muodostuu kuva kirkkaissa kohdissa horisontaalilinjien ylivarautuminen ja kirkkaan kohteen leviäminen. Parannetussa menetelmässä (Traversal Signal Line design, TSL, Hitachi) kullakin fotelementillä on oma horisontaali- ja vertikaali-MOS-kytkin. Tällöin yksittäinen elementti on kytketty signaalilinjoihin vain silloin kun sitä luetaan /8/.



CCD-sensorin yksittäisten elementtien varaukset siirretään sarjassa analogisessa muodossa varaussiirtorekisterien avulla ulostuloon. Puolijohdemateriaaliin aikaansaadaan jännitteellisten hilojen avulla potentiaalkuoppia, joista muodostetaan varaussiirtorekisteri. Fotoelementtien signaalivaraukset siirretään näihin kuoppiin. Kellottamalla hilojen jännitettä jaksollisesti saadaan kuopat siirtymään ja kuljettamaan signaalivaraukset mukanaan. Tämä on havainnollistettu kuvassa 9.



**Kuva 9.** Kolmivaiheinen n-kanavainen CCD-kenno. Varausta siirtävät potentiaalkuopat näkyvät piisubstraatin poikkileikkauksessa (a). Peräkkäisten ajanjaksojen potentiaalidiagrammit(b,c,d) havainnollistavat varauksen siirtoa [28/].

#### 4. VALONLÄHTEET

Valoa aikaansaadaan kahdella tavalla; Kuumentamalla materiaalia hehkumistilaan tai virittämällä atomeja tai molekyylejä tilaan, jossa ne emittoivat näkyvää aallonpituutta. Planckin laki täydelliselle säteilijälle ilmoittaa säteilyenergian tietyllä aallonpituudella [25/:

$$M(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{ch}{\lambda kT}} - 1)} \quad (20)$$

$c$  valon nopeus =  $2,9978 \times 10^8$  m/s

$k$  Boltzmannin vakio =  $1,380 \times 10^{-23}$  Nm/°C



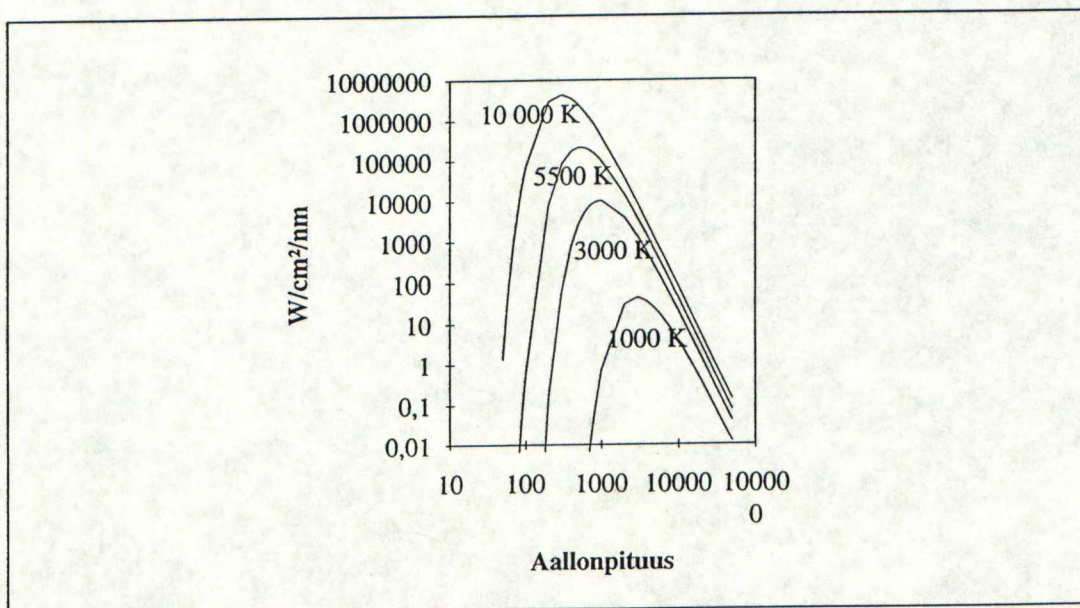
$h$  Planckin vakio =  $6,62 \times 10^{-34}$  Nms

$T$  lämpötila [K]

Kokonaissäteily lämpötilan funktiona saadaan integroimalla Planckin laki yli näkyvän aallonpituuden:

$$M(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 \quad (21)$$

Säteilyn värilämpötila on ideaalisen säteilijän lämpötila, jonka väri vastaa säteilyn väriä. Kuvassa 10 on tässä työssä laskettuja säteilytehoja aallonpituuden funktiona eri värilämpötiloissa. Valon värin ratkaisee spektrin muoto näkyvän aallonpituuden (400-700 nm) alueella.



**Kuva 10.** Ideaalisten säteilijöiden säteilytehoja aallonpituuden funktiona.

Kiinteät ja nestemäiset materiaalit voidaan saattaa hehkumistilaan usealla tavalla, kuten johtamalla sähköä niiden läpi, valottamalla, pommittamalla elektroneja tai kemiallisilla reaktioilla. Yleisimmin käytetään kuitenkin kuumentamista yli 1000 K:iin. Tärkein hehkuvista valonlähteistä on hehkulamppu. Säteilyteho on suoraan verrannollinen lämpötilaan. Lämpötilan kohotessa valo kirkastuu ja sen väri muuttuu punaisesta vaaleankeltaiseksi. Hehkumalla valaisevien lähteiden spektrit ovat jatkuvia ja verrannollisia ideaalisiin säteilijöihin.

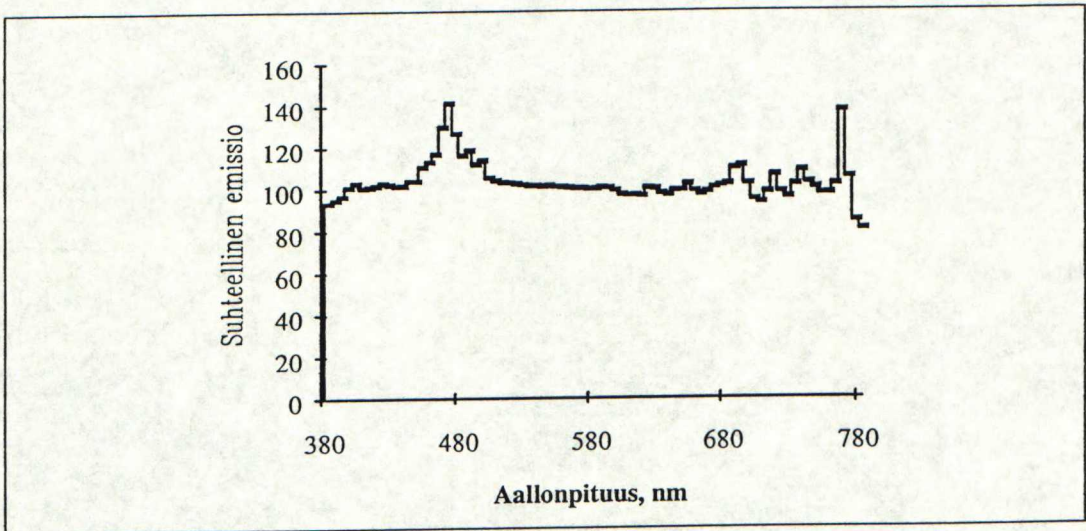
Kaasupurkauslamppujen spektrit ovat epäjatkuvia. Spektrin epäjatkuvuus johtuu atomiorbitaalien energiatasojen välillä tapahtuvista elektronien hyppäyksistä, jotka ovat diskreettejä.

Fluoresoivat lamput koostuvat lasiputkesta, jossa on matalassa paineessa elohopeakaasua. Putken sisäpinta on päällystetty fosforeilla, jotka virittyessään emittoi-



vat itselleen tyypillistä spektriä. Myös kaasupurkauksesta syntyy valoa, mutta pääosa lampun emissiospektristä tulee fosforista /10/.

Ksenon-lamput, joita käytetään yleisesti salamavaloina, sähkövirta kulkee ksenonkaasun läpi aiheuttaen ionisaation. Tässä työssä käytetään stroboskooppisalamaa, joka on ksenontäytteinen. Elektrodit sijaitsevat joko muutaman millimetrin (kompakti ksenonlähde) tai yli kymmenen senttimetrin päässä toisistaan (lineaarinen ksenon) Ksenon on joko jatkuvatoiminen, pulssitettu tai käyttäjän ohjaama salama. Tyypillisen ksenonlampun emissiospektri on esitetty kuvassa 11. Ksenonin väri vastaa jotakuinkin päivänvaloa, joskin se on hieman violettiin vivahdava, johtuen spektrin päissä olevista piikeistä.



**Kuva 11.** Erään Xenon valonlähteen spektri /10/.

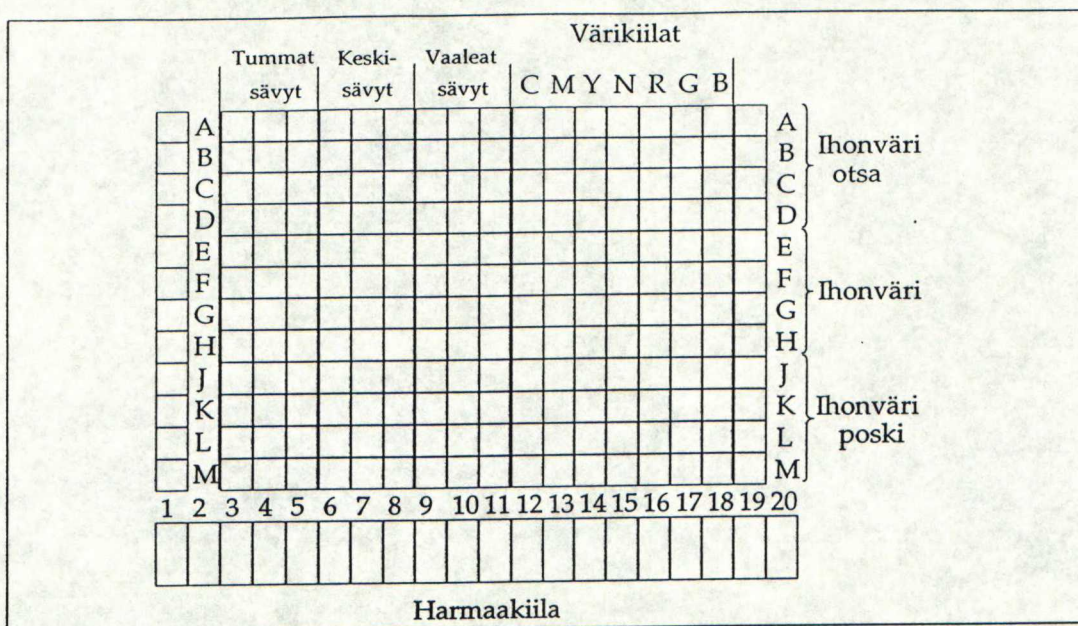
Laservalonlähteiden valoteho on suuri, mutta erittäin kapealla aallonpituusalueella, siksi niiden kanssa käytettävät detektorit täytyy valita tämä seikka huomioonottaen.

Skannereiden valonlähteinä käytetään tungsten-halogeenilamppuja, fluoresoivia valonlähteitä, ksenonlamppuja sekä lasereita. Skannerin toiminnan kannalta oleellisia ominaisuuksia ovat sopivat spektraaliset ominaisuudet sekä stabiili toiminta.

## 5. TESTIKUVA

Testikuvaksi valittiin Kodak Q60-C heijastusoriginaali, koska ANSI-standardin mukaista testikuvaa ei ollut työn alkaessa saatavilla. Q60-C on standardin ANSI IT8.7-2:n prototyyppi. Originaali on Kodak Ektacolor valokuvauspaperyä, jossa on 236 erilaista yksiväristä pintaa. Kuvassa 12 on kaaviokuva Kodak Q60-C testikuvasta. Liitteessä 1 on värikopio Kodak Q60-C testikuvasta.





**Kuva 12.** Kaaviokuva testikuvasta Kodak Q60-C.

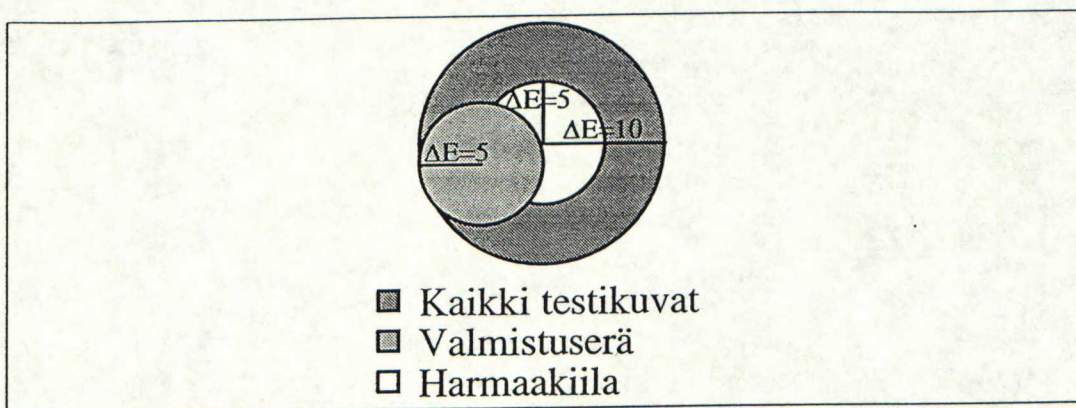
Kuvassa on kaksi neutraalia kiilaa, sarake 15 sekä alareunan 20 tasoinen harmaakiila. Molemmat kiilat kattavat densiteetit valkoisesta mustaan visuaalisesti tasavälein. Sarake 15 on suhteutettu sen ympärillä olevien värikiiloihin. Alareunan kiila on dynaamiselta alueeltaan laajempi, jotta reproduktiossa tapahtuvan sävyalueen pieneneminen olisi helpommin visuaalisesti arvioitavissa/19/. Alareunan harmaakiilan kenttiä nimitetään koodeilla N1-N20.

Testikuvassa on 204 värillistä kenttää. Sarakkeissa 12-14 ja 16-18 ovat puhtaat värit; syaani, magenta, keltainen, punainen, vihreä ja sininen. Värikiilat on toteutettu siten että värikentässä on sama määrä väriainetta kuin saman rivin harmaakiilassa, sarake 15. Sarakkeissa 1-11 on 120 kenttää, jotka kattavat valokuvamateriaalin väriavaruuden. Lisäksi sarakkeessa 19 on tyypillisiä ihosävyjä /19/. Liitteessä 1 on Kodak Q60-C testikuva.

Testikuva tulee valmistaa jokaiselle valokuvamateriaalille erikseen, koska materiaalien väriaineiden spektraaliset ominaisuudet vaihtelevat. Niinpä myös eri paperien ja filmien väriavaruudet ovat erilaiset. ANSI IT8.7/2 standardin mukaisessa testikuvassa onkin kolme kromaattisuussaraketta 4,8 ja 12, jotka on tarkoitettu materiaaliikohtaiseen käyttöön, sekä väriaine- ja neutraalikiilat, jotka niinkään valmistetaan materiaaliikohtaisesti. Lisäksi kolme saraketta on jätetty toimittajan määrittäviksi.

Standardi määrittelee testikuville kaksi tasoa: Kalibroimattomat ja kalibroidut testikuvat. Kalibroimattomalla testikuvalla on toleranssi  $\Delta E_{Lab}=10$  määrätyleille testikentille sekä testikuvan erälle  $\Delta E_{Lab}=5$ , kuva 13. Kalibroidut testikuvat ovat toimittajan mittaamia kalibroimattomia kuvia. Sertifikoidut mittaustulokset toimitetaan testikuvan mukana.





**Kuva 13.** Testikenttien toleranssit  $\Delta E_{Lab}$ -koordinaatistossa /2/.

## 6. TESTATUT LAITTEISTOT JA KUVAUSOLOSUHTEET

Työssä kalibroitiin DTP-tasoinen skanneri, 3-CCD kamerapohjainen ARGUS-mittausyksikkö sekä SuperVHS videokamera. Kaikki laitteet perustuvat CCD-tekniikkaan.

### 6.1 DTP-skanneri

Sharp JX-450 tasoskanneri on ensimmäisiä täysvärisiä eli 24-bittisiä desktop-skannereita, jotka tulivat markkinoille 80-luvun lopulla. Laite toimii VTT/Gra:ssa Macintosh-ympäristössä. Maksimikuvakoko on A3, myös läpäisyoriginaaleja voidaan käyttää lisälaitteen avulla. Tässä työssä sitä ei ole käytetty. Maksimi digitoitiresoluutio 300 dpi.

Testikuva skannattiin Adobe PhotoShop 2.0 kuvankäsittelyohjelmalla ja talletettiin raaka-RGB:nä kovalevyille. Skannattaessa käytettiin resoluutiota 300 dpi, hidasta skannausnopeutta ja gamma-arvoa 1,0. Reunan korostukset kytkettiin pois päältä. Gamma-arvo määritellään

$$y = x^{\frac{1}{\gamma}} \quad (22)$$

, jossa	x	input-signaali
	y	output-signaali
	$\gamma$	nk. gamma-arvo

Gamma-arvon ollessa yksi input-signaali=output-signaali.

Skannerin valonlähteiden värit ovat punainen, sininen ja vihreä. Punaiseen ja siniseen lamppuun on lisätty lisäksi suotimet, niiden spektraalisten ominaisuuksien parantamiseksi. Lamput sijaitsevat peräkkäin, poikkisuuntaisesti skannaussuuntaan



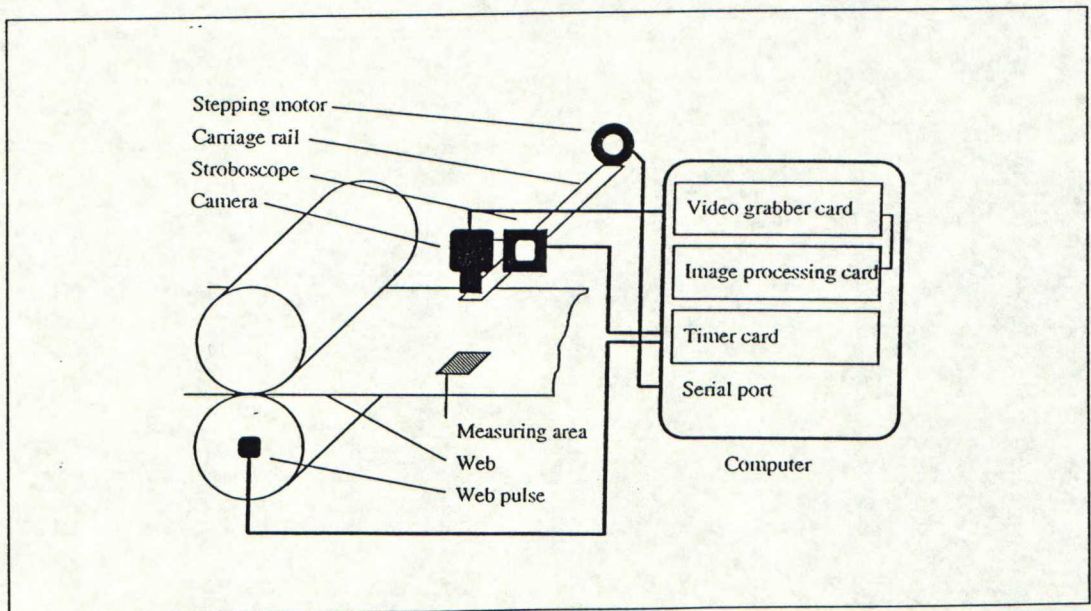
nähdessä. Skannatessa jokainen lamppu syttyy vuorollaan ja valo kulkeutuu hilan läpi kuvatasolle, josta heijastunut valo johdetaan kahden peilin kautta CCD-kennolle. Järjestely johtaa siihen, että värikuviin syntyy osavärien välistä kohdistusvirhettä. Sillä ei kuitenkaan ole tämän työn kannalta merkitystä. Kennossa on 3648 elementtiä, jotka mittaavat niihin kohdistuneen valon intensiteettiä. Intensiteetti digitoitetaan 8 bittiseksi, vaikka Sharp takaa kennon tarkkuudeksi 6 bittiä.

## 6.2 ARGUS-mittausyksikkö

Sony DXC-755P on 3CCD-videokamera, jonka kuvasensorin koko on 8,8×6,6 mm, jossa on 786×576 pikseliä. kennot ovat Interline-transfer kennoja, joiden S/N-suhde on 58 dB. Optiikaksi valittiin zoom-objektiivi (f:9,5-143 mm), lisäksi asennettiin linssisysteemi (+2,5 diopteria) objektiivin eteen, tarpeeksi suuren suurenussuhteen aikaansaamiseksi.

Kuva asennettiin testipenkin sylinterille. Valonlähteenä käytettiin stroboskooppisalamaa Philips PR9113. Se on ksenon-valonlähde, jonka valoenergia on 0,05...0,4 J/välähdys. Kameralla kuvattiin noin puolen metrin etäisyydeltä kuvan ollessa paikallaan ja salaman välähdellessä suurimmalla taajuudella 417 1/s. Pyrkimyksenä oli simuloida on-line mittausta liikkuvasta rainasta.

Videokamera liitettiin Matrox Image-Series-IM640 kuvansieppauskorttiin. Se muuntaa kameran PAL/RGB-signaalin 768×576 pikselin kokoiseksi 24 bittiseksi värikuvaksi, jossa osavärit koodataan 8:lla bitillä. Ympäristönä oli Intel-486 ja ohjelmistona VTT/Gra:ssa tehty ohjelmisto. Kuvassa 14 on kaaviokuva mittausyksiköstä



**Kuva 14.** 3-CCD kamerapohjainen rainan värinmittausjärjestely.



### 6.3 Super-VHS kameranauhuri

Panasonic NV-MS1 on tyypillinen keskihintainen S-VHS-kameranauhuri. Detektorina käytetään 1/2" CCD-kennoa, jossa on 420 000 pikseliä. Objektiivina 8-80 mm zoom, f:1,4.

Kuvaus tapahtui studio-olosuhteissa Teknillisen korkeakoulun videostudiossa. Valonlähteenä käytettiin Tungstenhalogeeni-valaisinta, jonka värilämpötila oli n. 3200 K. Kuva talletettiin kuvanauhurin omalla nauhurilla TDK Super-VHS-kasetille.

Kuva siepattiin VTT/Gra:n kehittämällä kuvansieppauskortilla, joka summaa neljä peräkkäistä kuvaa. Toistavana S-VHS nauhurina käytettiin Panasonicin puoliammattilaistason nauhuria.

## 7. KÄYTETYT MENETELMÄT

### 7.1 Kolorimetrinen mittaus

Testikuvan kolorimetrinen data mitattiin Gretag SPM100 spektrofotometrillä kulmalla 2°, valaistuksella  $D_{50}$ , ilman suodinta. Jokaisesta kentästä mitattiin viisi CIE-xyY arvoa. Näistä laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat. Saaduista keskiarvoista laskettiin testikuvan CIE XYZ-arvot seuraavasti:

$$X = \frac{Y_x}{y} \quad (23)$$

$$Y = Y \quad (24)$$

$$Z = \left( \frac{1}{y} - \frac{x}{y} - 1 \right) Y \quad (25)$$

Edelleen XYZ arvoista laskettiin CIE  $L^*a^*b^*$ -arvot valaistuksessa  $D_{50}$ .

### 7.2 Harmaasävykorjaus

Harmaasävyinkorjaus suoritettiin sovittamalla kolme suoraa R-, G- ja B-signaalien sekä testikuvan harmaakiilojen luminanssin Y pisteisiin.

Pienimmän neliösumman suora määritellään /17/:

$$y = b_0 + b_1 x \quad (26)$$



$$\text{jossa} \quad b_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (27)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}$$

Harmaasävykorjaukseen mitattavat kiilat olivat neutraaliikiila A15-M15 sekä N1-N20.

### 7.3 RGB→XYZ-muunnos usean selittäjän regression avulla

Muunnos harmaasävykorjatusta RGB:stä CIE-XYZ-koordinaatistoon suoritetaan usean selittäjän polynomiregressiolla. Polynomiregressiossa lasketaan eri asteisia muunnosmatriiseja käyttäen kaikkia testikuvan värikenttiä. Taulukossa 1 on esitetty eriasteisia sovituspolynameja.

CIE XYZ-koordinaatisto osoittautui parhaiten regressiomuunnokseen sopivaksi väriavaruudeksi. Työssä kokeiltiin lyhyesti skannerin avulla myös CIE xyY- ja L\*a\*b\*-koordinaatistoja. Niiden värivirheet olivat kuitenkin lähes kymmenkertaisia XYZ:aan verrattuna.

#### Taulukko 1. Eriasteisia muunnospolynameja /14/.

1.  $3 \times 3$  matriisi: Lineaaritermit

$$X = a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B$$

$$Y = a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B$$

$$Z = a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B$$

2.  $3 \times 6$  matriisi: Lineaari- ja ristitulotermit

$$X = a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B + a_{14}RG + a_{15}RB + a_{16}GB$$

$$Y = a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B + a_{24}RG + a_{25}RB + a_{26}GB$$

$$Z = a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B + a_{34}RG + a_{35}RB + a_{36}GB$$

3.  $3 \times 9$  matriisi: Lineaari-, ristitulo- ja toisen asteen termit

$$X = a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B + a_{14}RG + a_{15}RB + a_{16}GB + a_{17}R^2 + a_{18}G^2 + a_{19}B^2$$

$$Y = a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B + a_{24}RG + a_{25}RB + a_{26}GB + a_{27}R^2 + a_{28}G^2 + a_{29}B^2$$

$$Z = a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B + a_{34}RG + a_{35}RB + a_{36}GB + a_{37}R^2 + a_{38}G^2 + a_{39}B^2$$

4.  $3 \times 14$  matriisi: Lineaari-, ristitulo-, toisen asteen, kolmannen asteen sekä musta- ja valkotermit

$$X = a_{10} + a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B + a_{14}RG + a_{15}RB + a_{16}GB + a_{17}R^2 + a_{18}G^2 + a_{19}B^2 + a_{110}RGB + a_{111}R^3 + a_{112}G^3 + a_{113}B^3$$

$$Y = a_{20} + a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B + a_{24}RG + a_{25}RB + a_{26}GB + a_{27}R^2 + a_{28}G^2 + a_{29}B^2 + a_{210}RGB + a_{211}R^3 + a_{212}G^3 + a_{213}B^3$$

$$Z = a_{30} + a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B + a_{34}RG + a_{35}RB + a_{36}GB + a_{37}R^2 + a_{38}G^2 + a_{39}B^2 + a_{310}RGB + a_{311}R^3 + a_{312}G^3 + a_{313}B^3$$

Olkoon testikuvassa  $N$  kenttää, määritellään  $3 \times N$  matriisi  $U$ , jossa on testikuvasta mitatut CIE-XYZ-arvot, ja  $3 \times N$  matriisi  $V$ , jossa on harmaakorjatut RGB-signaalit ja



$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & \dots & Z_{3N} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2N} \\ B_{31} & B_{32} & \dots & B_{3N} \end{bmatrix}$$

Muunnosmatriisi  $\mathbf{M}$  saadaan minimoimalla matriisi  $\mathbf{U}-\mathbf{MV}$  /24/. Matriisin  $\mathbf{M}$  komponentit saadaan minimoimalla jäännösvirhe  $E$

$$E = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N ((\mathbf{U} - \mathbf{MV})_{ij})^2. \quad (28)$$

Yhtälö voidaan kirjoittaa auki

$$E = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N ((\mathbf{U} - \mathbf{MV})(\mathbf{U} - \mathbf{MV})^T). \quad (29)$$

Kun

$$\mathbf{P} = \mathbf{V}\mathbf{V}^T \text{ ja } \mathbf{Q} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T. \quad (30)$$

Yhtälöstä (28) saadaan

$$E = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (\mathbf{U}\mathbf{U}^T - 2\mathbf{Q}\mathbf{M}^T + \mathbf{M}\mathbf{P}\mathbf{M}^T). \quad (31)$$

Yhtälön differentiaali komponenttien  $M_{ij}$  suhteen tuottaa

$$\mathbf{Q} = \mathbf{M}\mathbf{P} \quad (32)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{M} = \mathbf{Q}\mathbf{P}^{-1} \quad (33)$$

$$\mathbf{M} = (\mathbf{U}\mathbf{V}^T)(\mathbf{V}\mathbf{V}^T)^{-1} \quad (34)$$

Useamman asteen muunnosmatriiseja laskettaessa lasketaan taulukon 1 mukaisesti erilaisia lisätermejä matriisiin  $\mathbf{V}$ . Esimerkiksi laskettaessa toisen asteen muunnosmatriisia on



$$V = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2N} \\ B_{31} & B_{32} & \dots & B_{3N} \\ R_{11}G_{21} & R_{12}G_{22} & \dots & R_{1N}G_{2N} \\ R_{11}B_{31} & R_{12}B_{32} & \dots & R_{1N}B_{3N} \\ G_{21}B_{31} & G_{22}B_{32} & \dots & G_{2N}B_{3N} \\ R_{11}^2 & R_{12}^2 & \dots & R_{1N}^2 \\ G_{21}^2 & G_{22}^2 & \dots & G_{2N}^2 \\ B_{31}^2 & B_{32}^2 & \dots & B_{3N}^2 \end{bmatrix}$$

Muunnos siis kiinnitetään siihen valaistukseen, jolla matriisin  $U$  arvot mitataan. Siksi matriisin  $V$  arvot täytyy myös mitata valaistuksessa, jonka värilämpötila on vakio. Matriisi  $M$  siis kiinnittää tietyn mittausvalaistuksen laiteRGB-arvot tietyn standardi-valaistuksen XYZ-arvoihin.

## 8. TULOKSET

Testikuva kolorimetrinen mittaus suoritettiin kohdan 7.1 mukaisesti. Mittaustulokset on esitetty liitteessä 2. Kromaattisuuskoordinaattien keskihajontojen suhde keskiarvoihin olivat keskimäärin  $x=0,11 \%$  ja  $y=0,10 \%$ , luminanssin  $Y=0,29 \%$ . Näin pienet vaihtelut osoittavat Gretag SPM100 spektrofotometrin tarkaksi ja testikuvan kentät tasaisiksi. Suurimmillaan kromaattisuushajonnat olivat kentässä F15 ( $x=0,97\%$ ) ja M18 ( $y=0,94\%$ ). Luminanssin maksimihajonta oli myös kentässä F15 ( $Y=2,05\%$ ). Lasketut XYZ-arvot on esitetty liitteessä 3.

Tarkin värimittari testatuista laitteista oli Sharp JX-450 tasoskanneri. Kolmannen asteen muunnospolynomia käyttäen keskimääräinen värivirhe  $\Delta E_{Lab}$  oli 1,81. Taulukossa 2 on esitetty testattujen laitteiden värivirheiden tunnuslukuja muunnospolynomin termien lukumäärän funktiona.



**Taulukko 2.**  $\Delta E_{Lab}$  muunnospolynomin termien lukumäärän funktiona.

		Polynomin termien lukumäärä			
		3	6	9	14
Sharp JX-450 skanneri	Keskiarvo	2,92	2,83	2,04	1,81
	Keskihaj.	2,30	2,38	1,61	1,53
	Maksimi	12,77	13,62	10,21	10,48
Sony DXC-755P 3CCD-kamera	Keskiarvo	3,96	3,49	3,47	3,09
	Keskihaj.	3,38	2,32	2,74	2,45
	Maksimi	40,57	17,38	18,38	20,27
Panasonic NV-MS1kameranauhuri	Keskiarvo	12,01	9,47	8,84	8,50
	Keskihaj.	6,99	6,74	5,80	6,12
	Maksimi	36,13	46,74	31,65	44,55

**8.1 Sharp JX-450 tasoskanneri**

Skannerissa valaistuksen voidaan olettaa olevan vakion. Skannerin signaali oli melko tasainen yli kuva-alueen. Kohinan pienentämiseksi laiteRGB mitattiin neljän kuvan pikselien keskiarvoista. Signaali-kohinasuhde SNR skannerille, kun  $S=255$  ja

$$N = \sqrt{s_R^2 + s_G^2 + s_B^2} = 1,92$$

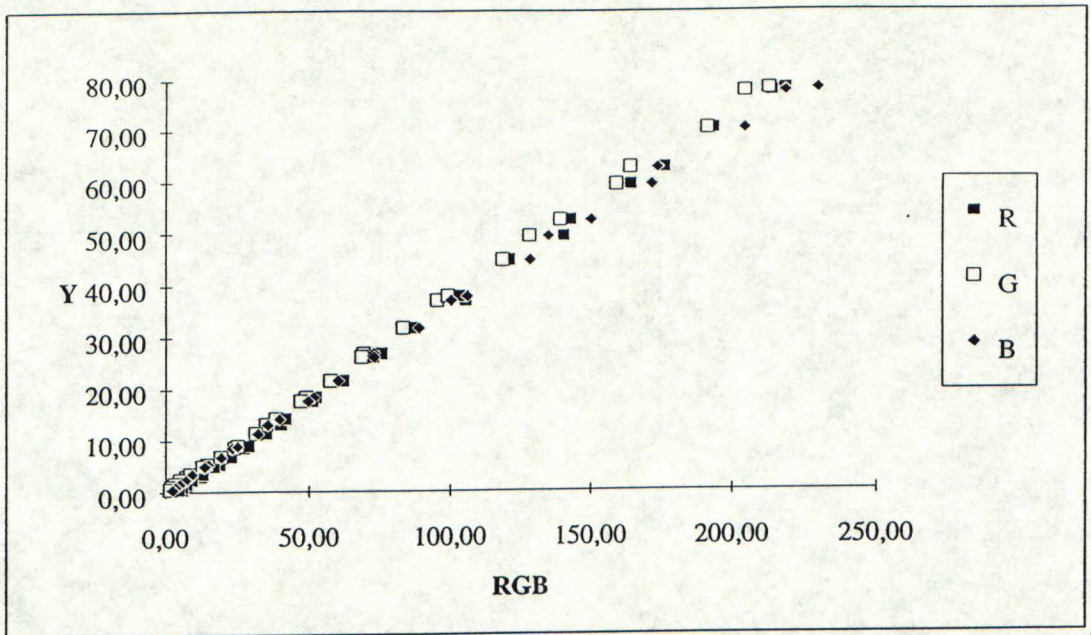
jossa  $s_R, s_G$  ja  $s_B$  RGB-signaalien keskihajonnat

$$SNR = 20 \log \frac{S}{N} = 42,46 \text{ db}$$

Tällainen kuvasignaalin laatu riittää sanomalehtipainatuksen syöttösignaaliksi /20/.

Kuvasensorin vaste harmaakiiloihin A15-M15 ja N1-N20 on esitetty kuvassa 15.





**Kuva 15.** Testikuvan luminanssi Y Sharp JX-450 skannerilla harmaakentistä mitattujen R-, G- ja B-signaalien funktiona.

Kuten kuvasta huomataan ovat R-, G- ja B-signaalit lineaarisesti riippuvia luminanssista Y. Harmaakorjauksen yhtälöt skannerille olivat:

$$R_g = 0,9395R - 3,3335$$

$$G_g = 0,9559G + 0,1996$$

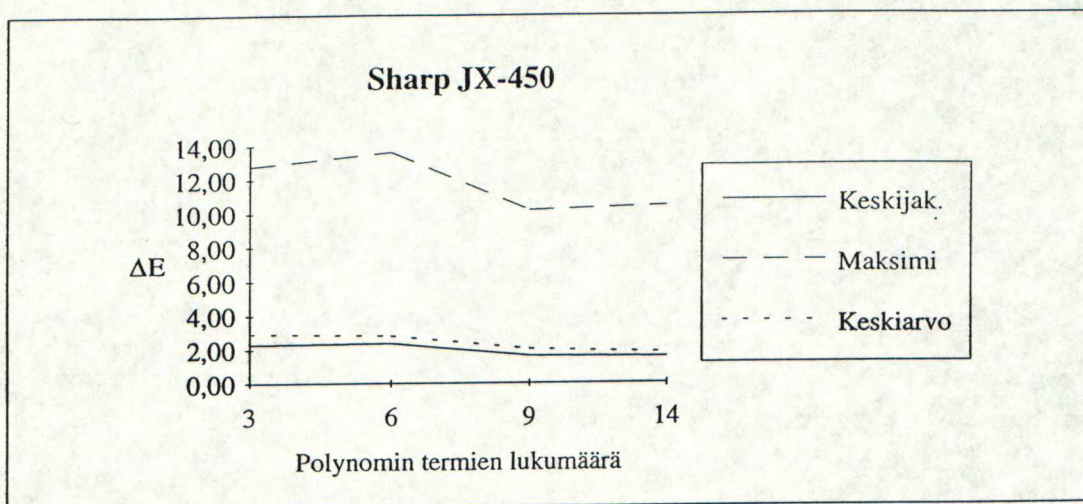
$$B_g = 0,8917B + 0,5958$$

Harmaakorjauksen jälkeen laskettiin muunnosmatriisit kohdan 7.3 mukaisesti Mat-L\*a\*b\*-ohjelmistolla. Matriisit on esitetty liitteessä viisi.

CIE XYZ arvot laskettiin kertomalla saaduilla matriiseilla kunkin testikentän harmaakorjatut RGB-arvot. XYZ-arvoista laskettiin kaavojen (4)-(9) avulla sekä CIE L\*a\*b\* että L\*C\*h\* arvot.

Keskimääräinen värivirhe oli pienin kolmannen asteen sovituksella. Sovituksen tehokkuus on verrannollinen polynomin termien lukumäärään. Kuvassa 16 on skannerin värivirheet esitetty graafisesti. Siitä näkyy selvästi käytetyn RGB-XYZ-muunnoksen taipumus minimoida vain värivirheen keskiarvoa, ei maksimia.





**Kuva 16.** Sharp JX-450:n värivirheiden keskiarvot, -hajonnat ja maksimit muunnospolynomin termien lukumäärän funktiona.

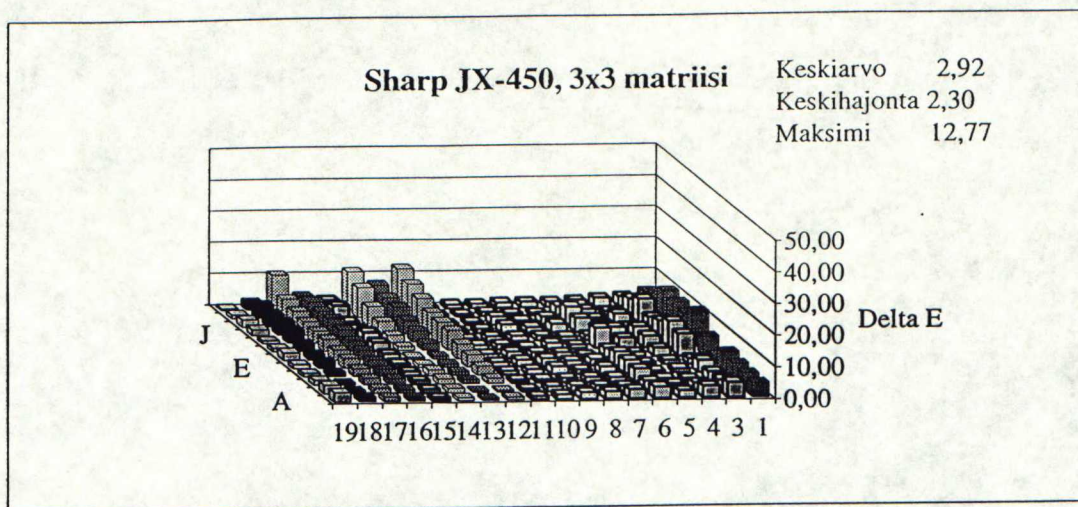
Taulukossa 3 on lueteltu kymmenen suurinta värivirhettä ja kentät jossa ne esiintyivät.

**Taulukko 3.** Sharp JX-450: Kymmenen suurinta värivirhettä  $\Delta E_{Lab}$

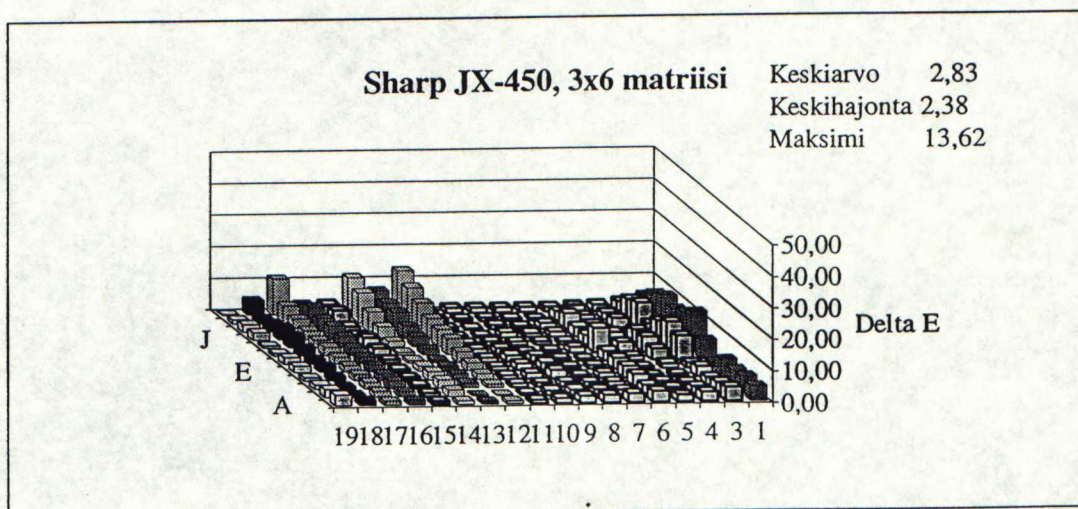
3×3		3×6		3×9		3×14	
Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$
M12	12,77	M12	13,62	M17	10,21	M12	10,48
M14	11,79	G1	12,79	M12	9,13	M17	9,32
G1	11,45	M14	11,65	M14	8,37	L12	7,12
M17	11,12	M17	11,37	N20	7,61	L18	7,00
L12	10,48	L12	10,87	G3	7,30	J1	6,26
K1	10,21	K1	10,08	H1	7,29	M14	5,87
L14	9,48	H1	10,00	G1	6,85	M15	5,73
J1	9,22	G3	9,49	L12	6,07	N19	5,71
K12	8,64	L14	9,41	N19	5,89	K1	5,61
G3	8,23	K12	8,59	H3	5,81	K3	5,53

Kentät M12 ja M17 eli syyaanin ja vihreän väriaineen tummimmat ja kromaattisimmat kentät olivat selvästi vaikeimpia sovittaa. Suuret  $\Delta E_{Lab}$ :t aiheutuvat kromaattisista virheistä, ei niinkään luminanssivirheistä. Matriisi laskee sovituksen joko liian punaiseksi tai siniseksi, ts.  $a^*$ :sta tulee liian iso tai  $b^*$ :sta liian pieni. Kuvissa 17-20 on esitetty kenttien A1-M20  $\Delta E_{Lab}$ :t.

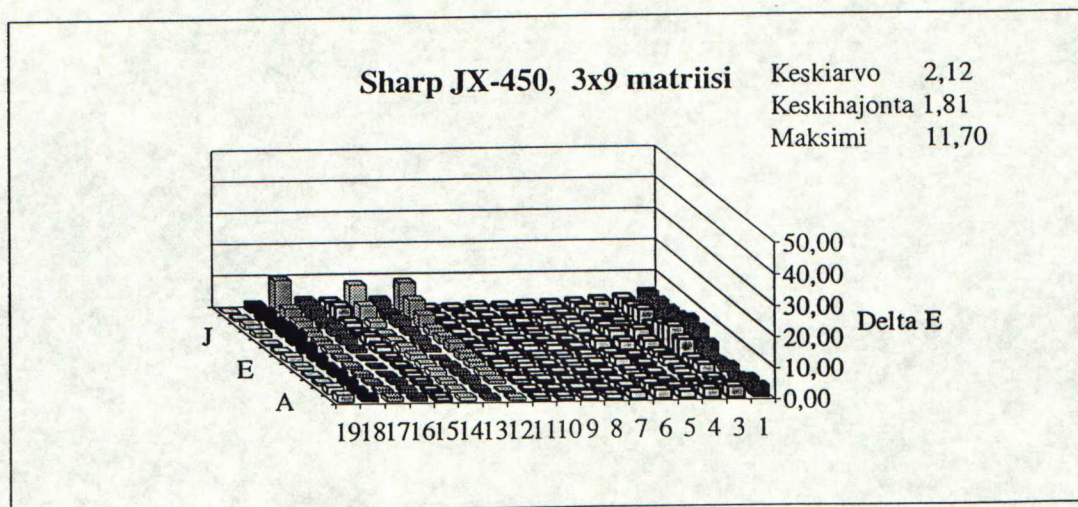




**Kuva 17.** Sharp JX-450 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x3 matriisilla.

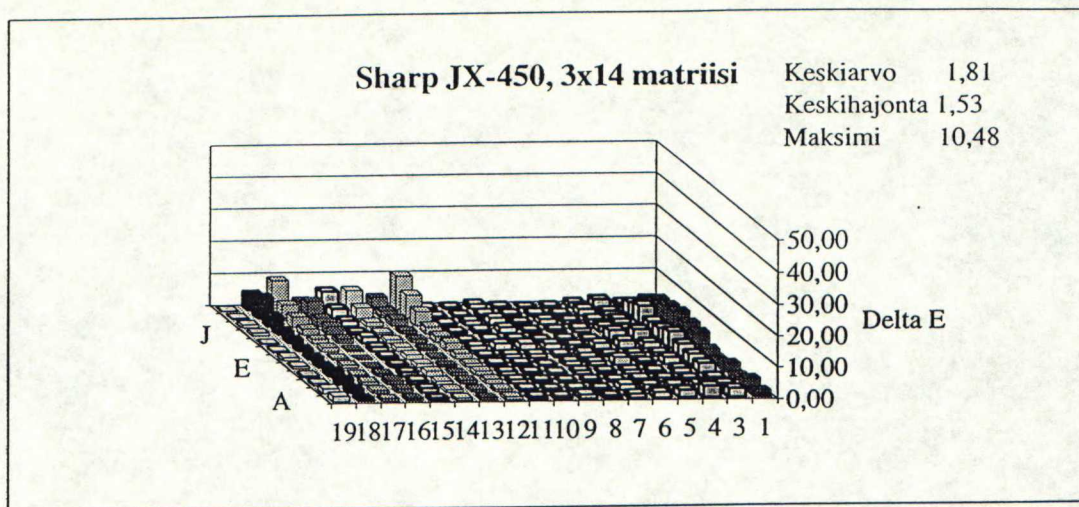


**Kuva 18.** Sharp JX-450 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x6 matriisilla.



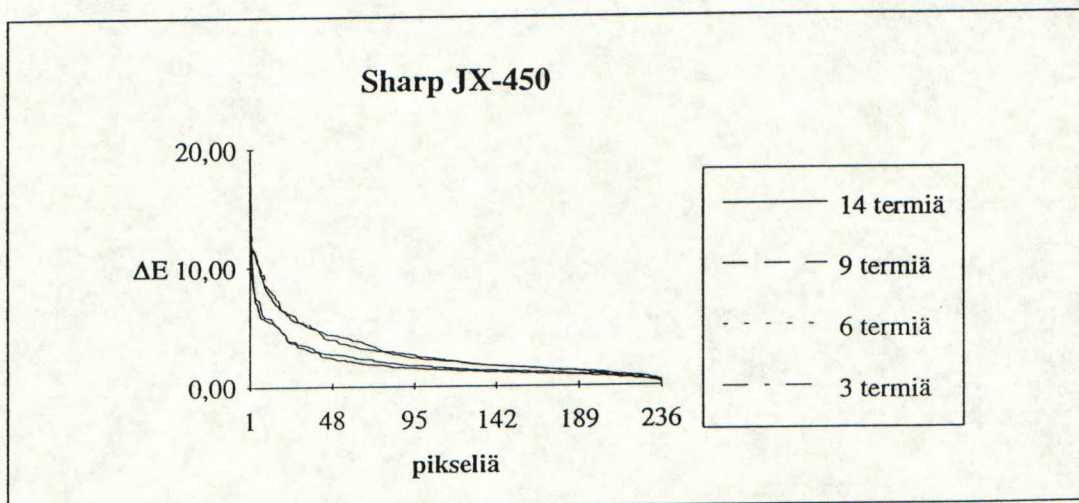
**Kuva 19.** Sharp JX-450 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x9 matriisilla.





**Kuva 20.** Sharp JX-450 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x14 matriisilla.

Kuvassa 21 on esitetty skannerin  $\Delta E_{Lab}$ -jakauma suurimmasta värivirheestä pienimpään. Kuvaajasta nähdään, kuinka useamman termin sovitus saavuttaa pienemmän keskimääräisen värivirheen laskemalla jyrkemmin suurilla  $\Delta E_{Lab}$ -arvoilla.



**Kuva 21.** Muunnospolynomien  $\Delta E_{Lab}$ -jakaumat.

## 8.2 ARGUS-mittausyksikkö

Geometriasta johtuen valaistuksen tasaisuus on videokameralla kuvattaessa aina ongelmana, koska sekä valolähde että kamera sijaitsevat melko kaukana kohteesta. Myös stroboskooppi salaman aiheuttama valotehonsäilytys aiheuttaa RGB-signaaliin kohinaa. Myös kuvansiirtopauskortin ominaisuudet vaikuttavat värikuvan laatuun.

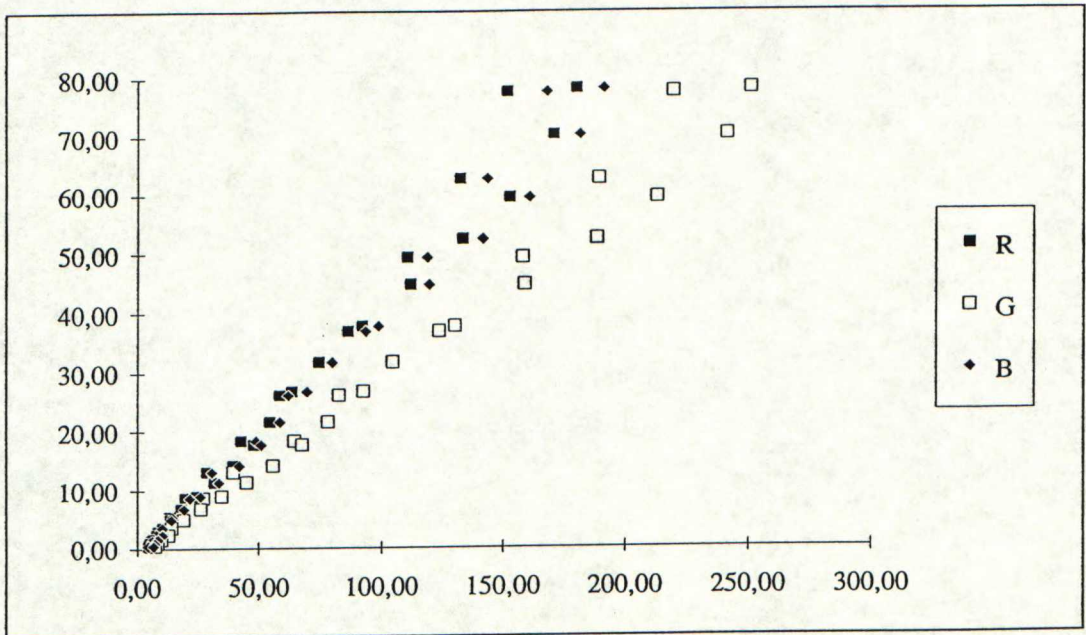
Signaali-kohinasuhde mittausjärjestelylle oli



$$SNR = 20 \log \frac{251}{4,86} = 34,3db$$

Vaikka kohinaa pyrittiin pienentämään summaamalla kuusi siepattua kuvaa, SNR laskee huomattavasti kameran 58db:stä. Suurimpana syynä lieneekin sekä paikallisesti että ajallisesti epätasainen valaistus.

Kuvassa 22 on systeemin vaste testikuvan harmaakiilojen luminansseihin.



**Kuva 22.** Testikuvan luminanssi Y Sony DXC-755P 3CCD-videokameralla harmaakentistä mitattujen R-, G- ja B-signaalien funktiona.

Harmaakorjauksen yhtälöt yksikölle olivat:

$$R_g = 1,1234R - 3,6086$$

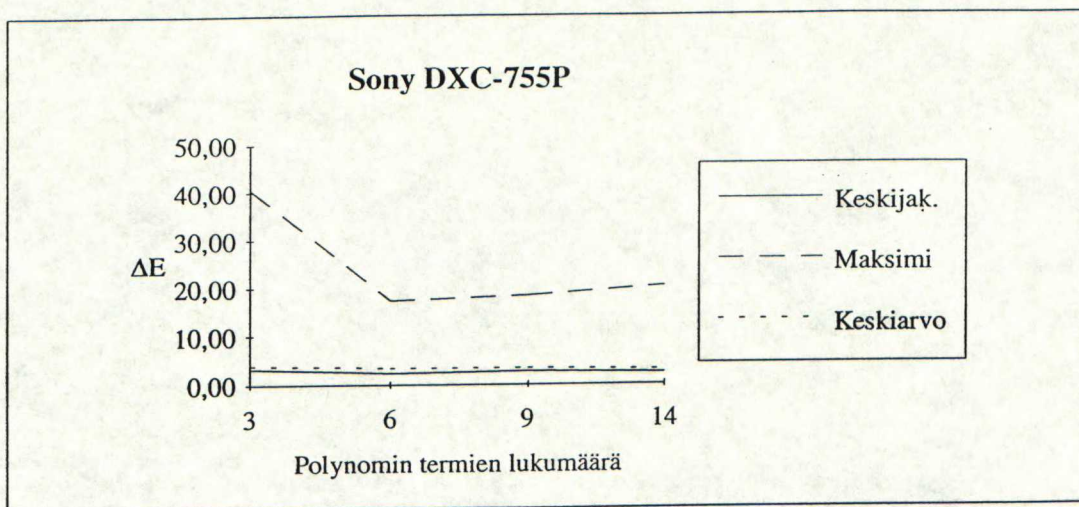
$$G_g = 0,7952G - 3,8568$$

$$B_g = 1,0538B - 4,0785$$

Muunnosmatriisit on esitetty liitteessä 6.

Keskimääräinen värivirhe oli pienin kolmannen asteen sovituksella. Kuvassa 23 on kameran värivirheet esitetty graafisesti. Kuten aiemminkin, vain värivirheen keskiarvo minimoituu.





**Kuva 23.** Sony DXC-755P:n värivirheiden keskiarvot, -hajonnat ja maksimit muunnospolynomin termien lukumäärän funktiona.

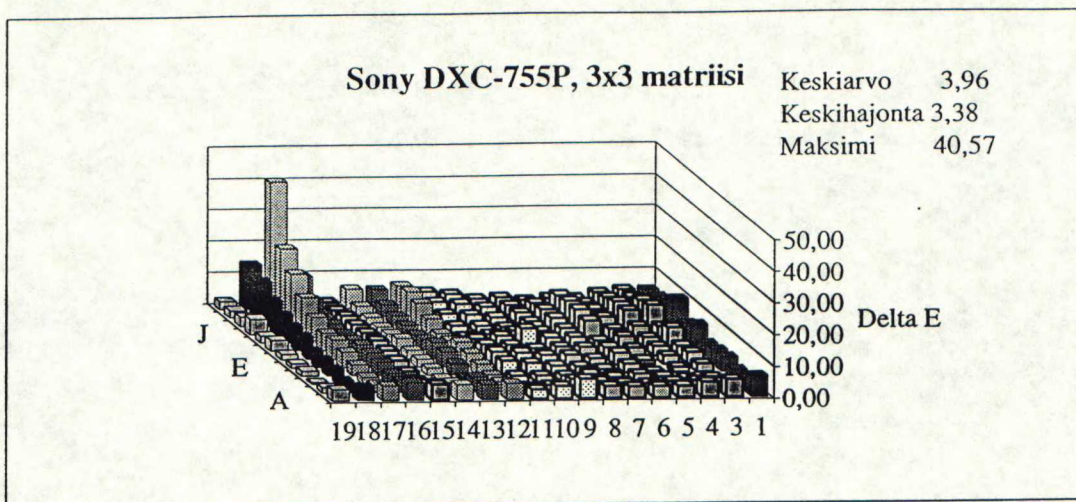
Taulukossa 4 on lueteltu kymmenen suurinta värivirhettä ja kentät, jossa ne esiintyivät.

**Taulukko 4.** Sony DXC-755P: Kymmenen suurinta värivirhettä  $\Delta E_{Lab}$ .

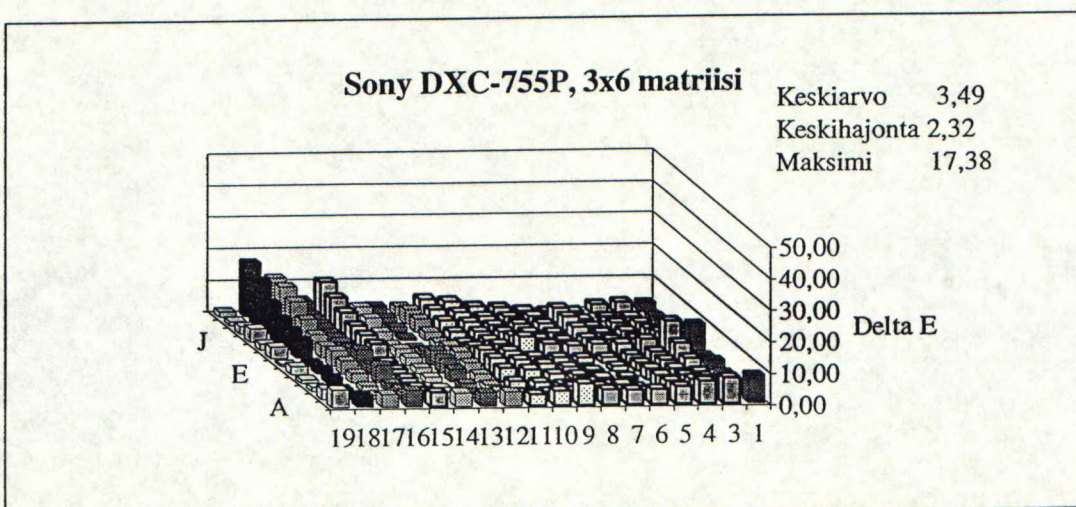
3×3		3×6		3×9		3×14	
Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$
M17	18,78	M18	17,38	M17	18,38	M17	20,27
L17	17,82	L18	14,20	M14	17,31	G1	18,42
M18	14,56	M17	12,31	L17	17,14	M16	13,59
K17	14,32	L17	12,27	M18	15,54	L15	11,58
L18	11,90	M15	11,01	G1	14,58	L17	11,24
M15	10,77	G3	10,46	K17	12,88	G6	10,28
J17	10,15	K17	10,12	G3	11,96	G3	9,5
G3	9,34	K18	9,83	L18	11,20	K17	8,24
G1	9,01	G1	9,57	M15	9,73	N20	8,09
K18	8,29	A1	9,01	L14	9,44	G12	7,07

Toisin kuin skannerille, Sony-kameralla nurkkaus K17-M18 eli sinisen ja vihreän värikiilan tummimmissa ja kromaattisimmissa kentissä oli suurimmat värivirheet. Jälleen suurimmat värivirheen aiheuttajat olivat kromaattisuuskoordinaatit. Kuvissa 24-27 graafiset esitykset testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheistä

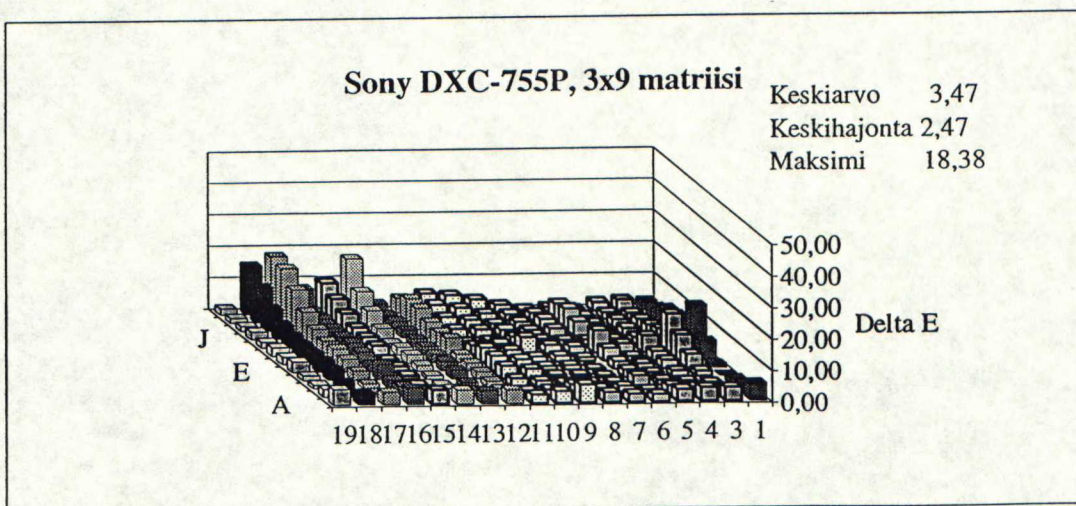




**Kuva 24.** Sony DXC-755P testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värvirheet 3x3 matriisilla.

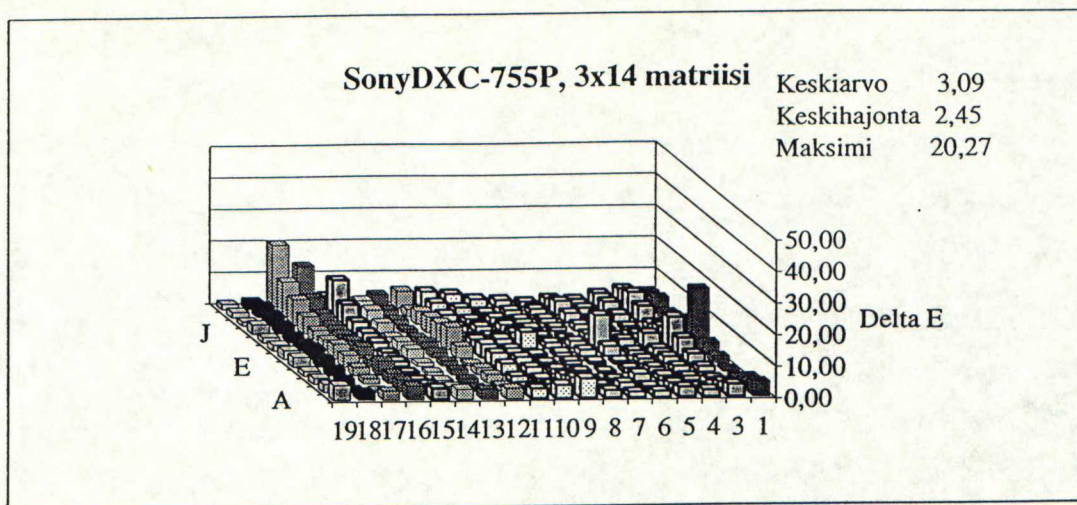


**Kuva 25.** Sony DXC-755P testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värvirheet 3x6 matriisilla.



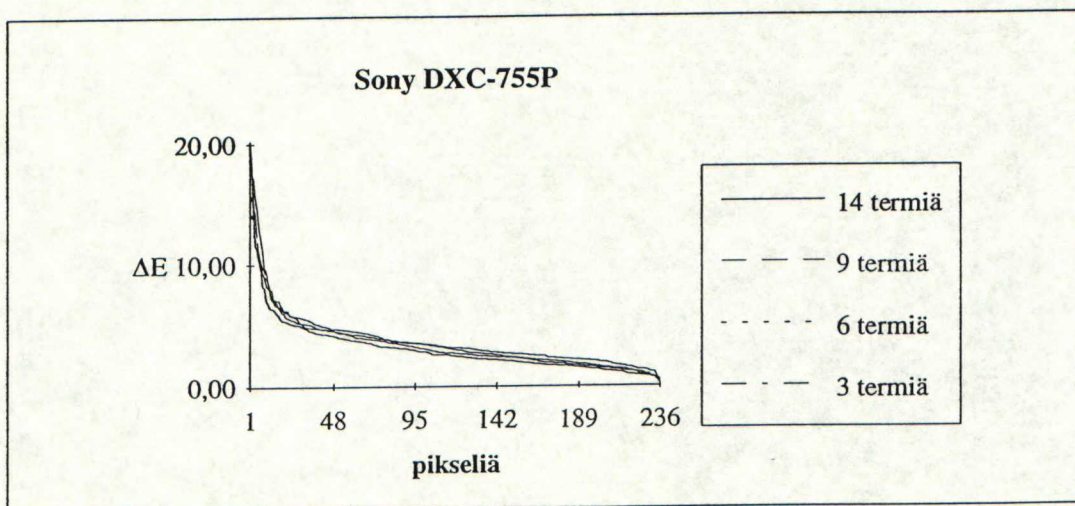
**Kuva 26.** Sony DXC-755P testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värvirheet 3x9 matriisilla.





**Kuva 27.** Sony DXC-755P testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x14 matriisilla.

Tarkasteltaessa kameran värivirhejakaumia, kuva 28, huomataan niiden olevan samanmuotoisia kuin skannerin. Toisen ja kolmannen asteen sovituksset eivät kuitenkaan yltäneet yhtä hyvin tuloksiin kuin Sharpilla.



**Kuva 28.** Muunnospolynomien  $\Delta E_{Lab}$ -jakaumat.

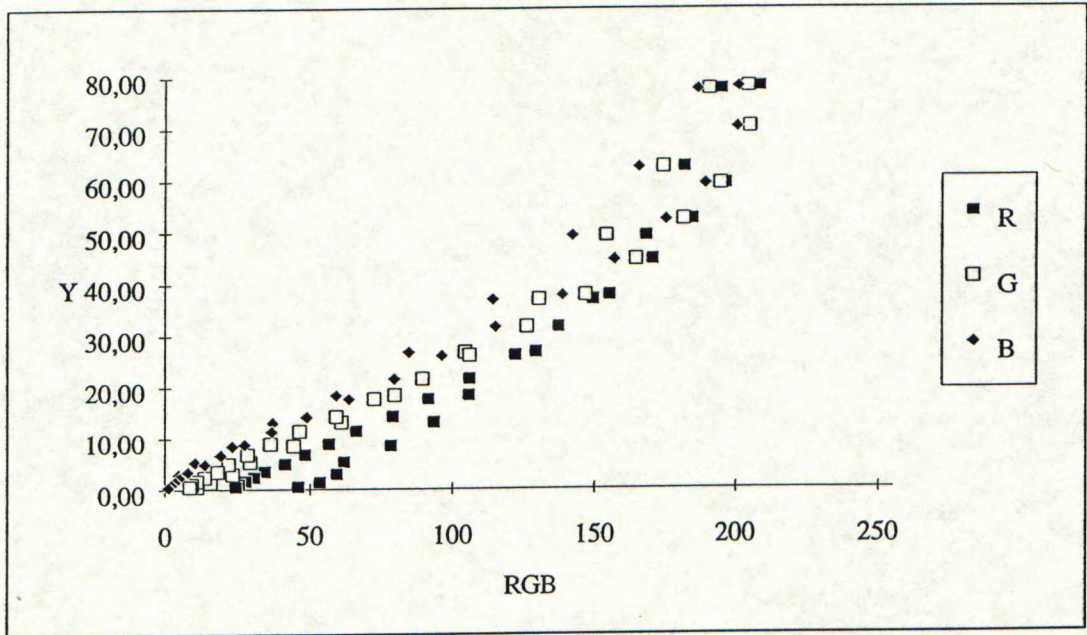
### 8.3 Panasonic MS-1 SuperVHS videokamera

Edellisiin tapauksiin verrattuna Super-VHS kameran kalibrointi on huomattavasti vaikeampaa jo laitteiston yksinkertaisuuden takia. Yksi CCD-matriisi ja raitasuotimen suodatuskyky asettavat rajoituksia videokameran väriherkkyydelle. Tämä näkyy selvästi alla olevasta kuvasta 20, jossa sekä luminanssin ylä- että alapäässä rgb-signaali kyllästyy. Myös kohinaa on aikaisempiin tapauksiin verrattuna enemmän. Signaalikohinasuhde oli



$$SNR = 20 \log \frac{210}{5,86} = 31,1 \text{ db}$$

SVHS-kameran signaali-kohinasuhde on pienempi, vaikka kuvaolosuhteet olivat 3CCD-kameraa vakaammat. Kuvassa 29 on SVHS-kameran RGB-signaalien vastet testikuvan harmaakiiloille.



**Kuva 29.** Testikuvan luminanssi Y Panasonic MS-1 SuperVHS videokameralla harmaakentistä mitattujen R-, G- ja B-signaalien funktiona.

Harmaakorjauksen yhtälöt kameranauhurille olivat:

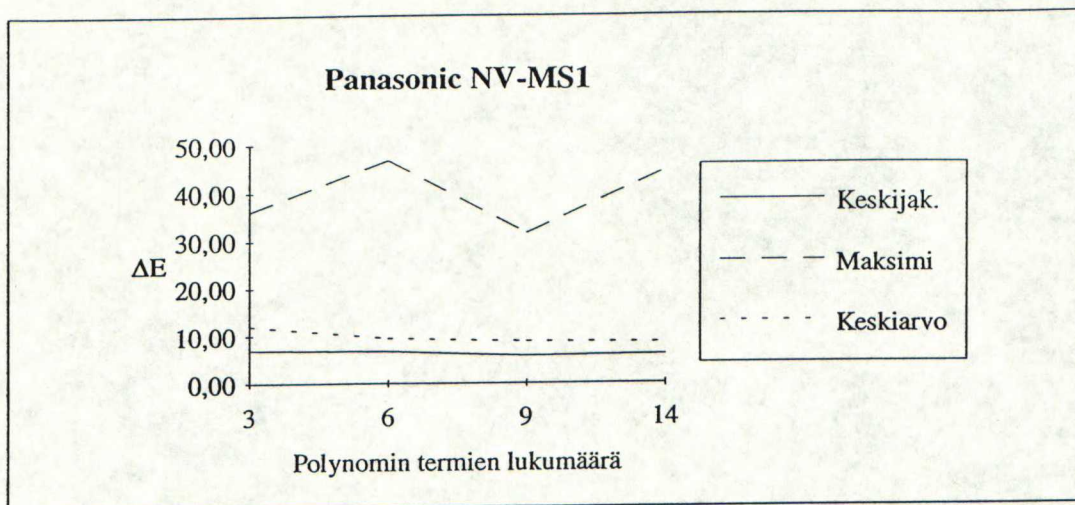
$$R_g = 0,9928R - 20,0283$$

$$G_g = 0,8957G + 6,0591$$

$$B_g = 0,8727B + 17,7144$$

Liitteessä 7 on esitetty lasketut muunnosmatriisit Panasonic NV-MS1 kameranauhurille. Kuvassa 30 on graafisesti esitetty SVHS-kalibroinnin tunnusluvut.





**Kuva 30.** Panasonic NV-MS1:n värivirheiden keskiarvot, -hajonnat ja maksimit muunnospolynomin termien lukumäärän funktiona.

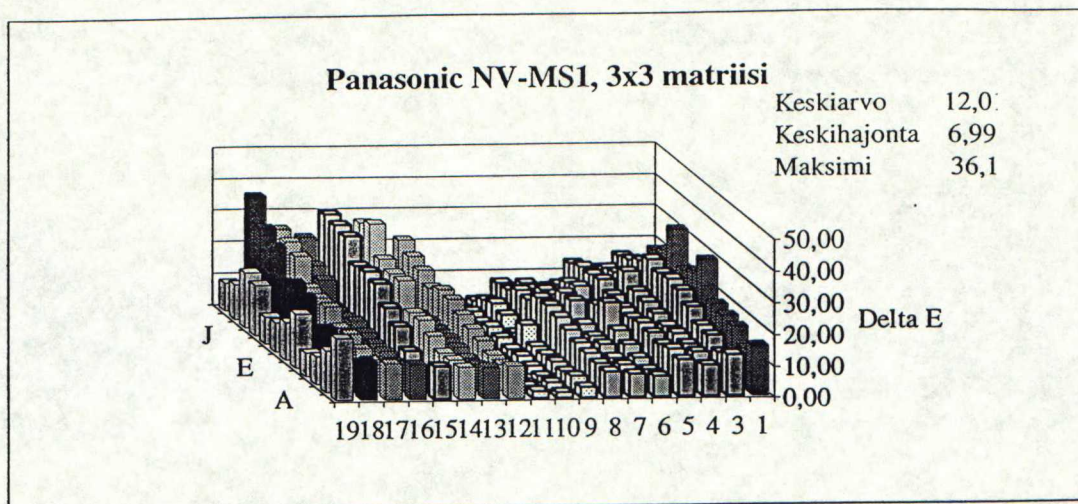
Keskimääräinen värivirhe on pienin kolmannen asteen muunnoksella. Pienin maksimivirhe savutetaan toisen asteen sovituksella, joka on keskimäärinkin lähes yhtä hyvä kuin kolmannen asteen sovituskkin. Taulukossa 5 on esitetty jokaiselle muunnokselle kymmenen suurinta  $\Delta E_{Lab}$ -värivirhettä.

**Taulukko 5.** Panasonic NV-MS1 kymmenen suurinta värivirhettä.

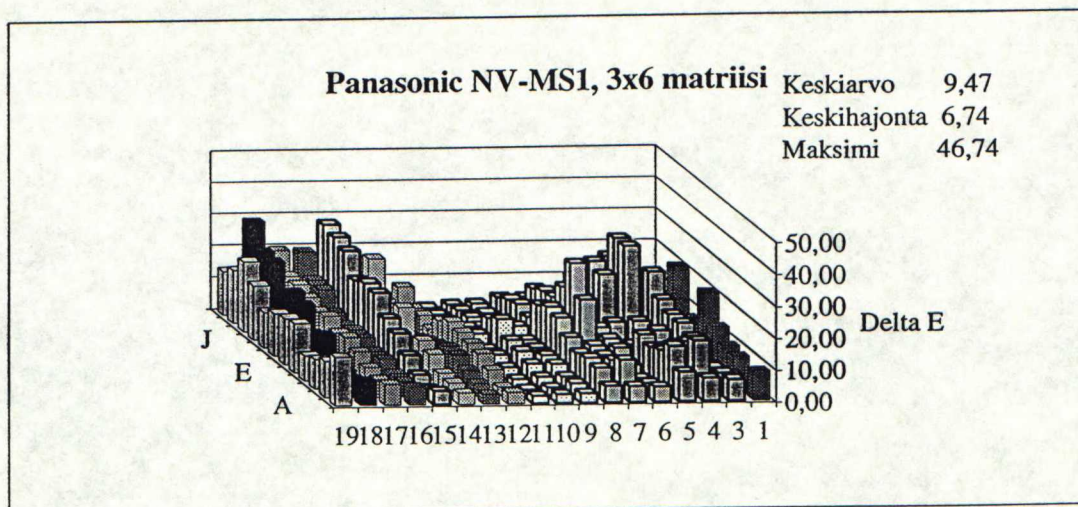
3×3		3×6		3×9		3×14	
Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$	Kenttä	$\Delta E_{Lab}$
M18	36,13	N20	46,74	N20	31,65	N19	44,55
K14	32,23	N19	33,07	M18	30,94	N20	37,63
J1	31,91	M18	29,16	M16	28,02	M15	32,78
M15	30,07	M15	28,00	N19	24,76	K15	31,69
F1	30,05	G7	27,97	M15	24,32	L15	30,95
L14	29,86	J4	27,86	L18	24,05	N18	25,64
N8	29,59	K4	27,81	F7	22,81	J15	22,70
L15	29,33	L15	26,53	K18	22,65	J1	21,69
N18	28,44	N18	25,62	L15	22,23	M14	21,18
K15	28,40	K15	24,85	J4	21,52	H15	20,76

SVHS-kameran värivirheet ovat oleellisesti suuremmat kuin edellisten laitteiden. Jälleen suurimmat värivirheet esiintyvät pääosin puhtaiden värien kentissä, matalilla luminanssiarvoilla. Kuvissa 31-34 graafiset esitykset testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheistä.

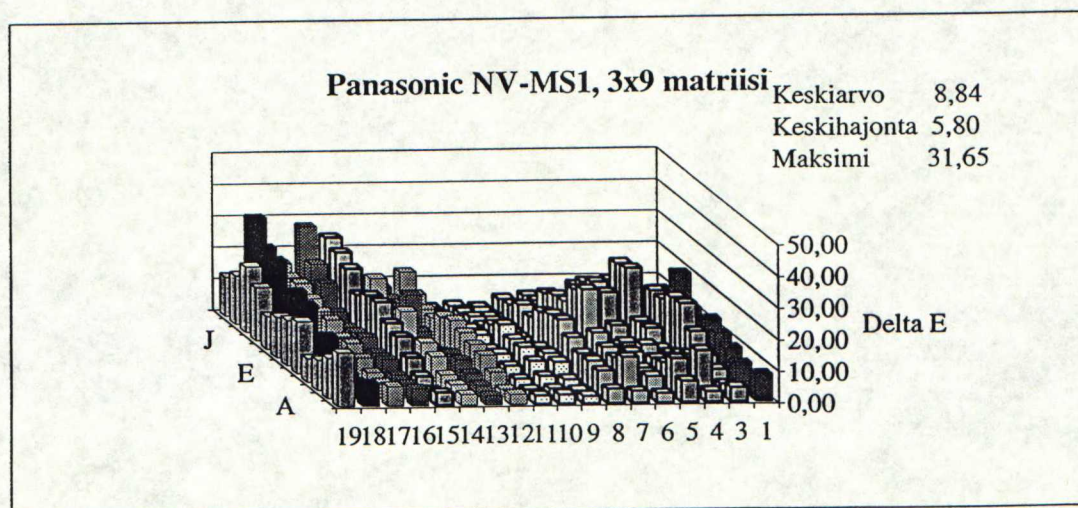




**Kuva 31.** Panasonic NV-MS1 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x3 matriisilla.

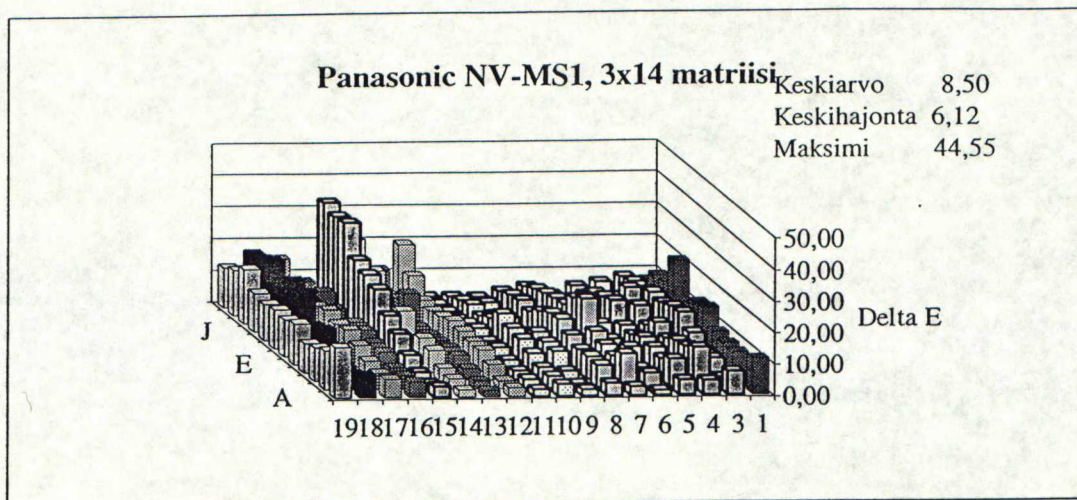


**Kuva 32.** Panasonic NV-MS1 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x6 matriisilla.



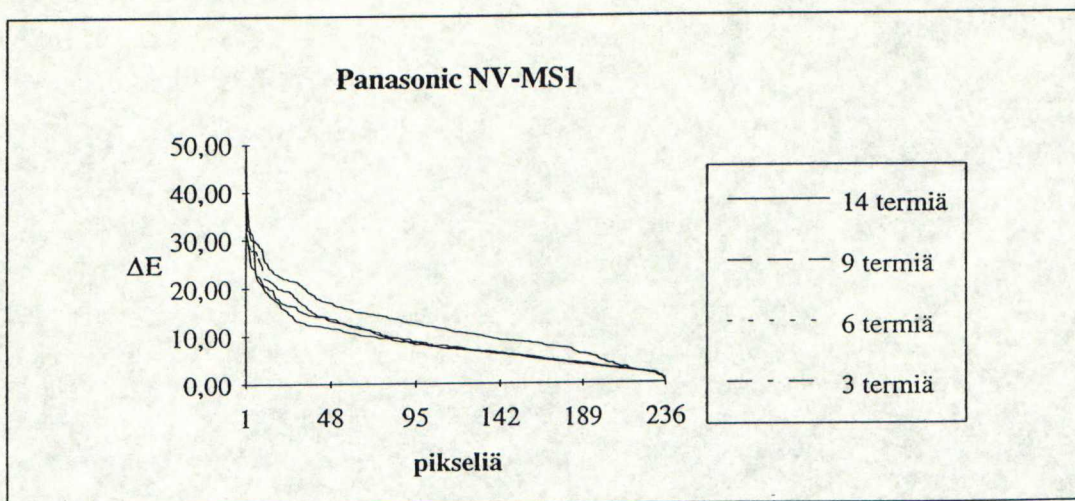
**Kuva 33.** Panasonic NV-MS1 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x9 matriisilla.





**Kuva 34.** Panasonic NV-MS1 testikenttien  $\Delta E_{Lab}$ -värivirheet 3x14 matriisilla.

Värvivirhejakaumat ovat selvästi suurempia kuin edellisissä tapauksissa, kuva 35.



**Kuva 35.** Panasonic NV-MS1 muunnospolynomien  $\Delta E_{Lab}$ -jakaumat.

## 9. VERTAILUT KIRJALLISUUDEN TULOKSIIN

Kirjallisuudessa on mainittu useita kolorimetrisia skannerin kalibrointeja. Kang /13,14/ esitti tässä työssä käytetyn menetelmän. Artikkelissa on kalibroitu Sharp JX-450 skanneri. Testikuvana käytettiin MacBeth ColorCheckeriä sekä Kodak Q60:tta. Tulokset esitetty taulukossa 6.



**Taulukko 6.** Kangin kolorimetrisen kalibroinnin tulokset,  $\Delta E_{Lab}$  /13,14/.

Testikuva	Polynomin termien lukumäärä			
	3	6	9	14
MacBeth	4,62	3,84	3,64	2,34
Kodak Q60	2,81	2,52	2,01	1,85

Hung /9/ on kalibroinut myös Sharp JX-450 skanneria. Menetelminä käytettiin polynomiregressiota sekä look-up taulukoita yhdessä interpolointi ja ekstrapolointimenetelmien kanssa. Testikuvina käytettiin digitaalisella tulostimella tehtyä värikarttaa ja kolmivärioffsetilla painettua testikuvaa.

**Taulukko 7.** Hungin kolorimetrisen kalibroinnin tulokset,  $\Delta E_{Lab}$  /9/.

Testikuva	Polynomin aste			LUT
	1. aste	2. aste	3. aste	
3-värioffset	5,7	2,6	1,8	0,4
dig. tulostus	4,7	2,8	2,2	1,1

Molemmat edellä esitetyt tulokset tukevat tässä työssä suoritettua Sharp JX-450 skannerin kalibrointia. Vaikka jokainen skanneri onkin yksilöllinen laite ja siten erikseen kalibroitava, nähdään tuloksista että vaihtelut ovat pieniä.

Suzuki et al /29/ kalibroivat skannerin RGB→L\*a\*b\*-muunnoksella, käyttäen 1142:ta testikenttää Japanese Industrial Standardista. Keskimääräinen  $\Delta E_{Lab} < 1,3$  ja maksimi  $\Delta E_{Lab}$  noin viisi. Algoritminä käytettiin Marquardtin pienimmän neliösumman menetelmää L\*a\*b\*-matriiseille /16/. Algoritmi on epälineaarinen ja soveltuu siten hyvin ko. muunnokseen.

Videokameroilla suoritettuja kalibrointien tuloksia ei kirjallisuudesta löytynyt, muutamia artikkeleita /18,27/, on kuitenkin kirjoitettu ja sen katsotaan sopivan ainakin epätasaisten pintojen värimittaukseen tyydyttävästi.

## 10. JOHTOPÄÄTÖKSET

Polynomisovitus on yksinkertainen, suoraviivainen ja nopea tapa kalibroida syöttölaite. Sen tunnusomaisena piirteenä on keskimääräisen värivirheen  $\Delta E_{Lab}$ :n minimoiminen. Suurimmat värivirheet voivat olla hyvinkin suuria, sovituksen aiheuttaman vipuvaikutuksen takia. Kalibrointi on myös tapauskohtainen, joten kalibrointi täytyy tehdä joka kerran olosuhteiden muuttuessa.

Kalibrointi on riippuvainen myös käytetystä testikuvasta. Parhaimpiin tuloksiin päästään, jos käytetään testikuvaa, joka kattaa tarkasteltavan väriavaruuden. Mitä enemmän on testikuvassa kenttiä sitä tarkempi on tulos/13,14/.



Värivirheen mittana käytetty  $\Delta E_{Lab}$ -yksikkö on juuri havaittava väriero. On huomioitava, että se on erittäin kova vaatimus värireproduktiolle. Esimerkiksi ISO 2846 standardissa kolmiväri päällekkäispainatuksen toleranssi on  $10,3 \Delta E_{Lab}/5/$ .

DTP-skannerin kalibroinnissa menetelmä osoittautui varsin käyttökelpoiseksi. Keskimääräiset värivirheet ovat jopa yksinkertaisimmalla muunnospolynomilla alle  $3 \Delta E_{Lab}$ . Skannerin väritarkkuus riippuu eniten valonlähteen kunnosta, joten mitä vanhempi skanneri on sitä useammin se tulee kalibroida.

ARGUS-mittausyksikön kalibrointi polynomiregression avulla on edellistä hankalampaa, koska valonlähteen ja kameran geometria on kriittinen tekijä. Lisäksi optiikka ja kuvansieppauskortti lisäävät systeemiin kohinaa. Parhaimmillaan päästiin kuitenkin lähes yhtä tarkkoihin tuloksiin kuin skannerilla. Menetelmä sopii ainakin sanomalehtirainan värimittaukseen, koska sen väriavaruus on melko pieni.

Panasonic SVHS-kameran kalibroitavuus oli selvästi muita huonompi. Siitä huolimatta sillä voisi olla käyttöä esimerkiksi videopainatuksessa, jossa värivirheet ovat yleensä erittäin suuria. Värimittariksi siitä ei kuitenkaan tällä menetelmällä ole.

Parempiin tuloksiin päästäisiin esimerkiksi jakamalla testikuva aliavaruuksiin, joille tehtäisiin jokaiselle oma muunnomatriisi. Myös useamman mitattavan kuvan summaaminen tarkentaisi tulosta. Tässä työssä käytettiin neljän kuvan summausta skannerille ja SVHS-kameralle, 3-CCD kameralle kuuden kuvan.



## LÄHDELUETTELO

- /1/ Anon, Sony DXC-755P Operating Instructions, Japan 1991, Sony Corporation, 135 s.
- /2/ Anon. Agfa First to Deliver Quantities of IT8.7/1/2 Calibration Targets. Dunn Report 11(1993)7. s. 3-14.
- /3/ Anon. Panasonic NV-MS1 käyttäjän käsikirja.
- /4/ Buchsbaum, G., The Retina as a Two-Dimensional Detector Array in the Context of Color Vision Theories and Signal Detection Theory. Proceedings of the IEEE 69(1981)7, s.772-786.
- /5/ Cornsweet, T.N. Visual Perception, New York 1971. 463 s.
- PK-F 391 /6/ Field, G.G. Color and Its Reproduction, Pittsburgh 1988, Graphic Arts Technical Foundation, 379 s.
- /7/ Field, G.G. Color Scanning and Imaging Systems, Pittsburgh 1990, Graphic Arts Technical Foundation, 309 s.
- /8/ Haikonen, P.O.A., Videotekniikka, Monila Oy, Helsinki 1992, 201 s.
- /9/ Hung, P., Colorimetric Calibration for Scanners and Media, SPIE 1448, Camera and Input Scanner Systems (1991)
- /10/ Hunt, R.W.G. Measuring colour, 2.ed, Great Britain 1991. 313 s.
- /11/ ISO 2846-1975 (E). Set of Printing Inks for Offset Printing-Colorimetric Characteristics, International Standard.
- /12/ Judd, D.B. Color in Business, Science and Industry. 3.p. New York 1975, John Wiley & Sons, Inc. 553 s.
- /13/ Kang, H.R. Color scanner calibration of reflected samples, SPIE 1670 Color Hard Copy and Graphic Arts 1992, s. 468-477
- /14/ Kang, H.R. Color Scanner Calibration, Journal of Imaging Science and Technology 36(1992)2, s. 162-170
- /15/ Laihanen, P., Digitaalinen painokuvan värireproduktio väriopilliselta kannalta tarkasteltuna. Teknillinen Korkeakoulu. Graafisen tekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 9. Otaniemi 1985
- /16/ Marquardt, D.W., An algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, SIAM Journal Appl. Math. 11(1963), s. 431-441

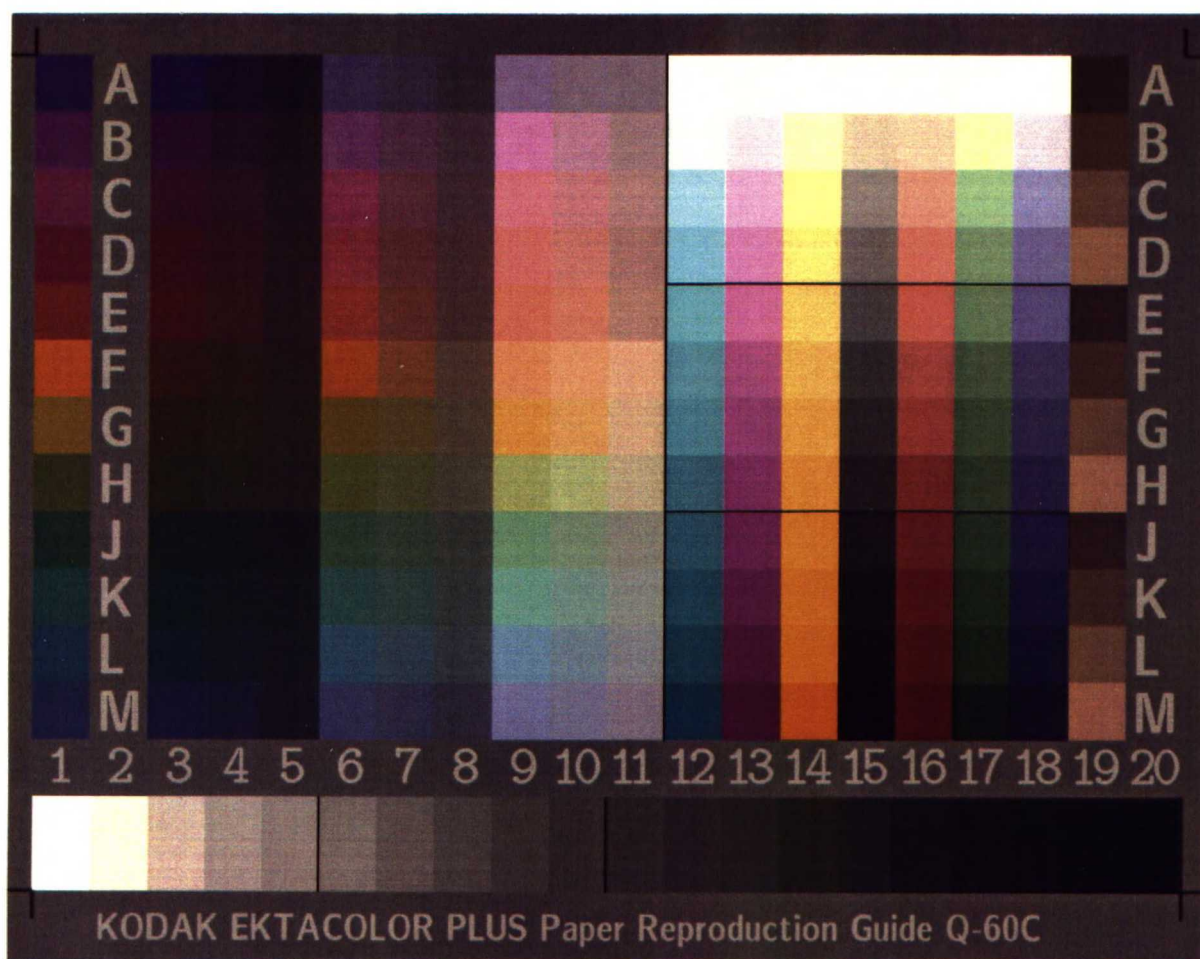


- /17/ Milton, J.S., Arnold, J.C., Probability and Statistics in the Engineering and Computing Sciences, Singapore 1986, McGraw-Hill, 643 s.
- /18/ Mumzhiu, A.M., Bunting, C.D., CCD camera as a tool for color measurement. SPIE 1670. Color Hard Copy and Graphic Arts. 1992.
- /19/ Rinehart, C. E., Design criteria for an input color scanner evaluation test object, SPIE 1073, Electronic Imaging Applications in Graphic Arts. 1989.
- /20/ Saarelma, H. Oittinen, P., Requirements for Digital Input Signals in Printing Reproduction. Graphics Arts in Finland 21(1993)2. s. 3-7.
- /21/ Saarelma, H., Oittinen, P., Automatic Picture Reproduction. Graphic Arts in Finland 22(1993)1, s. 3-11.
- /22/ Saarelma, H., Oittinen, P., Requirements for Digital Input Image Signals in Printing Reproduction. Graphic Arts in Finland 21(1992)2, s. 3-7.
- /23/ Saari, K.M. Silmätautioppi. 3.p. Forssa 1984, Tampereen lääketieteen kandidaattiseura. 384 s.
- /24/ Schwartz, J. Color Equalization, Journal of Imaging Science and Technology 36(1992)4, s. 328-334
- /25/ Serway, R. A., Physics for Scientists and Engineers. Saunders College Publishing. New York 1983. 1005 s.
- /26/ Silverman, L., Color imaging technologies in the prepress industry. SPIE 1670. Color Hard Copy and Graphic Arts. 1992.
- /27/ Spratlin T.L, Simpson M.L, Color measurements using a colorimeter and a CCD camera. SPIE 1670. Color Hard Copy and Graphic Arts. 1992.
- /28/ Sturge, J., Walworth, V., Shepp, A., ed., Imaging Processes And Materials, New York 1989, 712 s.
- /29/ Suzuki, S., Kusunoki, T., Masahiro, M. Color characteristic design for color scanners, Applied Optics 29(1990)34, s.5187-5192
- /30/ Södergård, C., Kuusisto, M., Xiaohan, Y., Sandström, K., On-line Control of the Colour Print Quality Guided by the Digital Page Description. Iarigai 22nd International Research Conference in Munich, Sept 1993. 21 s.
- /31/ Tuovinen, P., Detektio- ja tallennetekniikka, Luentomoniste 1, Otaniemi 1986, Teknillinen Korkeakoulu, 41 s.



/32/ Wyszecki,G., Stiles, W.S., Color Science:Concepts and Methods,  
Quantitive Data and Formulae. 2.p. NewYork 1982, John Wiley & Sons,  
Inc. 950 s.







# LIITE 2. Kodak Q-60C mitatut xyY-arvot

	x	y	Y
A 1	0,26284	0,19756	5,746
A 3	0,26366	0,19774	5,794
A 4	0,29094	0,23868	5,9
A 5	0,32158	0,29952	5,9984
A 6	0,31036	0,26738	17,17
A 7	0,32012	0,28682	17,448
A 8	0,33432	0,31596	17,448
A 9	0,33232	0,31478	40,364
A10	0,3399	0,32908	40,522
A11	0,3426	0,33758	40,94
A12	0,3481	0,35896	77,734
A13	0,34816	0,35896	77,836
A14	0,34876	0,35954	77,636
A15	0,34882	0,3596	77,628
A16	0,3487	0,3594	77,484
A17	0,3488	0,35954	77,68
A18	0,34834	0,35904	77,744
A19	0,4396	0,38924	8,484
B 1	0,3793	0,22798	10,47
B 3	0,37672	0,22674	8,144
B 4	0,3646	0,26344	8,426
B 5	0,35536	0,31188	8,208
B 6	0,374	0,26434	21,386
B 7	0,36016	0,28824	21,848
B 8	0,35444	0,32466	22,594
B 9	0,3606	0,31266	46,734
B10	0,35498	0,32642	48,752
B11	0,35474	0,34336	48,84
B12	0,3337	0,35696	71,172
B13	0,35256	0,3464	69,09
B14	0,36018	0,37146	75,882
B15	0,34944	0,3592	62,664
B16	0,3644	0,36046	68,004
B17	0,34554	0,36994	69,318
B18	0,3376	0,34608	64,216
B19	0,42728	0,38822	16,158
C 1	0,45426	0,26718	13,3
C 3	0,45156	0,27128	8,17
C 4	0,4212	0,30002	8,476
C 5	0,38588	0,32786	8,458
C 6	0,4284	0,28746	20,966
C 7	0,40476	0,31186	22,146
C 8	0,37502	0,33422	22,086
C 9	0,38166	0,33226	47,67
C10	0,37056	0,3364	47,032
C11	0,36174	0,34818	49,058
C12	0,31614	0,35362	63,144
C13	0,3573	0,3335	60,332
C14	0,37644	0,38716	73,162
C15	0,34972	0,3595	49,254
C16	0,38382	0,36142	57,814
C17	0,34174	0,3831	59,64
C18	0,32628	0,33086	51,208
C19	0,41444	0,38664	27,588
D 1	0,53916	0,30574	10,106
D 3	0,5173	0,31454	8,154
D 4	0,46544	0,33414	8,504
D 5	0,40874	0,34688	8,338
D 6	0,4697	0,33034	21,106

D 7	0,43316	0,34028	21,536
D 8	0,39182	0,35126	22,048
D 9	0,39996	0,34836	45,582
D10	0,3846	0,35276	46,432
D11	0,36968	0,35416	46,586
D12	0,29616	0,34868	54,64
D13	0,36422	0,31666	49,952
D14	0,39206	0,40382	70,662
D15	0,34894	0,35896	36,956
D16	0,40408	0,35832	47,842
D17	0,3364	0,39804	49,812
D18	0,31314	0,31262	38,8
D19	0,40874	0,38836	40,81
E 1	0,57264	0,36426	13,47
E 3	0,57868	0,36026	8,186
E 4	0,50768	0,37394	8,576
E 5	0,4187	0,37038	8,478
E 6	0,51654	0,37186	21,002
E 7	0,46354	0,37264	21,954
E 8	0,39912	0,36682	21,994
E 9	0,41598	0,36964	46,748
E10	0,3947	0,36764	47,306
E11	0,37218	0,36238	48,156
E12	0,28098	0,3461	47,822
E13	0,37156	0,30098	41,32
E14	0,41136	0,41742	67,3
E15	0,3472	0,3582	26,758
E16	0,42662	0,35684	38,636
E17	0,33096	0,41208	40,79
E18	0,30272	0,29586	28,468
E19	0,43866	0,37672	8,42
F 1	0,54138	0,42844	27,332
F 3	0,53264	0,41978	7,862
F 4	0,47924	0,41842	8,56
F 5	0,41708	0,3942	8,418
F 6	0,5286	0,42714	26,266
F 7	0,47632	0,41604	26,954
F 8	0,3929	0,3827	27,26
F 9	0,41624	0,39422	55,384
F10	0,39302	0,38354	55,936
F11	0,36976	0,37154	56,406
F12	0,26436	0,33792	39,758
F13	0,37938	0,28524	32,962
F14	0,43026	0,43126	64,214
F15	0,34238	0,35668	18,33
F16	0,45236	0,35566	30,624
F17	0,32972	0,42652	32,494
F18	0,29176	0,27916	20,338
F19	0,42268	0,3769	15,846
G 1	0,48746	0,48098	28,922
G 3	0,47938	0,46074	6,976
G 4	0,43886	0,44968	8,174
G 5	0,4001	0,41238	8,312
G 6	0,47144	0,47892	25,406
G 7	0,43028	0,44498	26,756
G 8	0,38132	0,39354	26,84
G 9	0,43304	0,44156	52,77
G10	0,40146	0,409	54,56
G11	0,3646	0,3736	55,984
G12	0,24778	0,3343	33,008



# LIITE 2. Kodak Q-60C mitatut xyY-arvot

G13	0,38524	0,27344	26,984
G14	0,44754	0,44002	60,824
G15	0,35126	0,35778	13,016
G16	0,47664	0,35394	24,782
G17	0,32266	0,44338	25,416
G18	0,2759	0,2595	14,44
G19	0,40918	0,37874	27,114
H 1	0,40276	0,53468	14,458
H 3	0,39696	0,51418	7,304
H 4	0,38526	0,47272	7,856
H 5	0,36978	0,4191	8,112
H 6	0,39688	0,49472	23,858
H 7	0,38038	0,44854	25,916
H 8	0,36344	0,39708	26,734
H 9	0,37354	0,41878	53,18
H10	0,36458	0,39902	55,872
H11	0,35794	0,37714	55,305
H12	0,23076	0,3277	25,884
H13	0,39626	0,26164	21,55
H14	0,466	0,4464	55,376
H15	0,34852	0,35852	8,536
H16	0,50484	0,35224	19,49
H17	0,31818	0,46504	19,764
H18	0,26032	0,23708	9,898
H19	0,40916	0,37972	40,436
J 1	0,24176	0,49596	7,808
J 3	0,26376	0,46842	4,936
J 4	0,28968	0,43628	5,31
J 5	0,31324	0,40172	5,58
J 6	0,2886	0,44112	18,624
J 7	0,30624	0,41246	20,35
J 8	0,3283	0,3859	21,728
J 9	0,31492	0,39434	41,766
J10	0,32912	0,38436	43,356
J11	0,33842	0,37112	45,074
J12	0,21374	0,32028	20,846
J13	0,40494	0,24924	17,208
J14	0,48482	0,45158	51,138
J15	0,3494	0,36028	5,284
J16	0,53668	0,3506	15,4
J17	0,31154	0,49148	15
J18	0,2382	0,20742	6,4
J19	0,43432	0,36888	8,454
K 1	0,19944	0,36764	10,334
K 3	0,20162	0,36674	4,73
K 4	0,24176	0,37276	5,238
K 5	0,28342	0,36816	5,572
K 6	0,23624	0,36962	18,118
K 7	0,27206	0,37306	20,256
K 8	0,31134	0,36694	21,294
K 9	0,29186	0,36856	43,044
K10	0,31046	0,36526	45,04
K11	0,32882	0,36296	46,706
K12	0,19564	0,31232	16,644
K13	0,41504	0,23824	13,6
K14	0,50006	0,45386	46,566
K15	0,34698	0,35996	2,886
K16	0,56892	0,34694	12,01
K17	0,30052	0,52412	11,008
K18	0,21478	0,17512	3,814

K19	0,41824	0,36936	15,62
L 1	0,17402	0,27396	8,88
L 3	0,17934	0,2708	4,792
L 4	0,21954	0,29666	5,268
L 5	0,26812	0,3231	5,61
L 6	0,2171	0,3043	18,266
L 7	0,25556	0,3208	20,42
L 8	0,30064	0,34244	21,642
L 9	0,28092	0,3329	41,166
L10	0,301472	0,34194	41,662
L11	0,32204	0,34994	43,284
L12	0,17766	0,301	12,822
L13	0,42762	0,22668	10,484
L14	0,51376	0,4559	42,816
L15	0,34206	0,35698	1,336
L16	0,60342	0,34088	9,044
L17	0,28754	0,5618	7,502
L18	0,1901	0,1357	2,008
L19	0,41004	0,37068	27,004
M 1	0,21416	0,22832	7,236
M 3	0,21224	0,22122	5,336
M 4	0,23556	0,24254	5,54
M 5	0,29038	0,29916	5,814
M 6	0,26448	0,27514	16,416
M 7	0,28486	0,29182	16,816
M 8	0,31148	0,31842	17,068
M 9	0,30632	0,31876	39,4
M10	0,31806	0,32872	39,098
M11	0,3303	0,3412	39,668
M12	0,15924	0,28518	9,198
M13	0,4466	0,21588	7,268
M14	0,53694	0,44278	33,058
M15	0,33532	0,35052	0,476
M16	0,63736	0,33036	6,316
M17	0,26904	0,58942	3,856
M18	0,17172	0,09972	0,892
M19	0,40668	0,37166	39,556
N 1	0,34896	0,35988	78,136
N 2	0,3472	0,36012	70,27
N 3	0,34834	0,35896	59,372
N 4	0,34762	0,35892	52,39
N 5	0,34662	0,35842	44,674
N 6	0,34714	0,35812	37,754
N 7	0,34686	0,35834	31,694
N 8	0,34756	0,35844	26,098
N 9	0,34738	0,3577	21,568
N10	0,34822	0,35736	17,598
N11	0,34824	0,35656	14,096
N12	0,34854	0,35662	11,31
N13	0,34916	0,35728	8,844
N14	0,34866	0,35916	6,736
N15	0,3488	0,36026	4,928
N16	0,34932	0,36108	3,486
N17	0,34408	0,3581	2,344
N18	0,3429	0,35608	1,53
N19	0,3392	0,3571	0,906
N20	0,33154	0,34286	0,434



# LIITE 3. Kodak Q60 lasketut CIE XYZ-arvot

	X	Y	Z				
A 1	7,64	5,75	15,69	D 7	27,41	21,54	14,34
A 3	7,73	5,79	15,78	D 8	24,59	22,05	16,13
A 4	7,19	5,90	11,63	D 9	52,33	45,58	32,93
A 5	6,44	6,00	7,59	D10	50,62	46,43	34,57
A 6	19,93	17,17	27,12	D11	48,63	46,59	36,33
A 7	19,47	17,45	23,91	D12	46,41	54,64	55,66
A 8	18,46	17,45	19,31	D13	57,45	49,95	50,34
A 9	42,61	40,36	45,25	D14	68,60	70,66	35,72
A10	41,85	40,52	40,76	D15	35,92	36,96	30,07
A11	41,55	40,94	38,79	D16	53,95	47,84	31,72
A12	75,38	77,73	63,44	D17	42,10	49,81	33,23
A13	75,49	77,84	63,51	D18	38,86	38,80	46,45
A14	75,31	77,64	62,99	D19	42,95	40,81	21,32
A15	75,30	77,63	62,94	E 1	21,18	13,47	2,33
A16	75,18	77,48	62,93	E 3	13,15	8,19	1,39
A17	75,36	77,68	63,01	E 4	11,64	8,58	2,71
A18	75,43	77,74	63,36	E 5	9,58	8,48	4,83
A19	9,58	8,48	3,73	E 6	29,17	21,00	6,30
B 1	17,42	10,47	18,04	E 7	27,31	21,95	9,65
B 3	13,53	8,14	14,24	E 8	23,93	21,99	14,03
B 4	11,66	8,43	11,90	E 9	52,61	46,75	27,11
B 5	9,35	8,21	8,76	E10	50,79	47,31	30,58
B 6	30,26	21,39	29,26	E11	49,46	48,16	35,27
B 7	27,30	21,85	26,65	E12	38,82	47,82	51,53
B 8	24,67	22,59	22,33	E13	51,01	41,32	44,96
B 9	53,90	46,73	48,84	E14	66,32	67,30	27,61
B10	53,02	48,75	47,58	E15	25,94	26,76	22,01
B11	50,46	48,84	42,94	E16	46,19	38,64	23,45
B12	66,53	71,17	61,68	E17	32,76	40,79	25,44
B13	70,32	69,09	60,04	E18	29,13	28,47	38,63
B14	73,58	75,88	54,82	E19	9,80	8,42	4,13
B15	60,96	62,66	50,83	F 1	34,54	27,33	1,93
B16	68,75	68,00	51,91	F 3	9,98	7,86	0,89
B17	64,75	69,32	53,31	F 4	9,80	8,56	2,09
B18	62,64	64,22	58,69	F 5	8,91	8,42	4,03
B19	17,78	16,16	7,68	F 6	32,51	26,27	2,72
C 1	22,61	13,30	13,87	F 7	30,86	26,95	6,97
C 3	13,60	8,17	8,35	F 8	27,99	27,26	15,98
C 4	11,90	8,48	7,88	F 9	58,48	55,38	26,63
C 5	9,95	8,46	7,38	F10	57,32	55,94	32,59
C 6	31,25	20,97	20,72	F11	56,14	56,41	39,27
C 7	28,74	22,15	20,12	F12	31,10	39,76	46,79
C 8	24,78	22,09	19,21	F13	43,84	32,96	38,76
C 9	54,76	47,67	41,04	F14	64,07	64,21	20,62
C10	51,81	47,03	40,97	F15	17,60	18,33	15,47
C11	50,97	49,06	40,87	F16	38,95	30,62	16,53
C12	56,45	63,14	58,97	F17	25,12	32,49	18,57
C13	64,64	60,33	55,94	F18	21,26	20,34	31,26
C14	71,14	73,16	44,67	F19	17,77	15,85	8,43
C15	47,91	49,25	39,84	G 1	29,31	28,92	1,90
C16	61,40	57,81	40,75	G 3	7,26	6,98	0,91
C17	53,20	59,64	42,84	G 4	7,98	8,17	2,03
C18	50,50	51,21	53,07	G 5	8,06	8,31	3,78
C19	29,57	27,59	14,19	G 6	25,01	25,41	2,63
D 1	17,82	10,11	5,13	G 7	25,87	26,76	7,50
D 3	13,41	8,15	4,36	G 8	26,01	26,84	15,35
D 4	11,85	8,50	5,10	G 9	51,75	52,77	14,99
D 5	9,82	8,34	5,87	G10	53,55	54,56	25,28
D 6	30,01	21,11	12,78	G11	54,64	55,98	39,23
				G12	24,47	33,01	41,26



# LIITE 3. Kodak Q60 lasketut CIE XYZ-arvot

G13	38,02	26,98	33,68
G14	61,86	60,82	15,54
G15	12,78	13,02	10,59
G16	33,37	24,78	11,86
G17	18,50	25,42	13,41
G18	15,35	14,44	25,85
G19	29,29	27,11	15,18
H 1	10,89	14,46	1,69
H 3	5,64	7,30	1,26
H 4	6,40	7,86	2,36
H 5	7,16	8,11	4,09
H 6	19,14	23,86	5,23
H 7	21,98	25,92	9,88
H 8	24,47	26,73	16,12
H 9	47,44	53,18	26,37
H10	51,05	55,87	33,10
H11	52,49	55,31	38,85
H12	18,23	25,88	34,88
H13	32,64	21,55	28,18
H14	57,81	55,38	10,87
H15	8,30	8,54	6,98
H16	27,93	19,49	7,91
H17	13,52	19,76	9,21
H18	10,87	9,90	20,98
H19	43,57	40,44	22,48
J 1	3,81	7,81	4,13
J 3	2,78	4,94	2,82
J 4	3,53	5,31	3,34
J 5	4,35	5,58	3,96
J 6	12,18	18,62	11,41
J 7	15,11	20,35	13,88
J 8	18,48	21,73	16,09
J 9	33,35	41,77	30,79
J10	37,12	43,36	32,32
J11	41,10	45,07	35,28
J12	13,91	20,85	30,33
J13	27,96	17,21	23,88
J14	54,90	51,14	7,20
J15	5,12	5,28	4,26
J16	23,57	15,40	4,95
J17	9,51	15,00	6,01
J18	7,35	6,40	17,11
J19	9,95	8,45	4,51
K 1	5,61	10,33	12,17
K 3	2,60	4,73	5,57
K 4	3,40	5,24	5,42
K 5	4,29	5,57	5,27
K 6	11,58	18,12	19,32
K 7	14,77	20,26	19,27
K 8	18,07	21,29	18,67
K 9	34,09	43,04	39,66
K10	38,28	45,04	39,99
K11	42,31	46,71	39,66
K12	10,43	16,64	26,22
K13	23,69	13,60	19,79
K14	51,31	46,57	4,73
K15	2,78	2,89	2,35
K16	19,69	12,01	2,91
K17	6,31	11,01	3,68
K18	4,68	3,81	13,29

K19	17,69	15,62	8,98
L 1	5,64	8,88	17,89
L 3	3,17	4,79	9,73
L 4	3,90	5,27	8,59
L 5	4,66	5,61	7,10
L 6	13,03	18,27	28,73
L 7	16,27	20,42	26,97
L 8	19,00	21,64	22,56
L 9	34,74	41,17	47,75
L10	36,73	41,66	43,45
L11	39,83	43,28	40,57
L12	7,57	12,82	22,21
L13	19,78	10,48	15,99
L14	48,25	42,82	2,85
L15	1,28	1,34	1,13
L16	16,01	9,04	1,48
L17	3,84	7,50	2,01
L18	2,81	2,01	9,98
L19	29,87	27,00	15,97
M 1	6,79	7,24	17,67
M 3	5,12	5,34	13,67
M 4	5,38	5,54	11,92
M 5	5,64	5,81	7,98
M 6	15,78	16,42	27,47
M 7	16,41	16,82	24,39
M 8	16,70	17,07	19,84
M 9	37,86	39,40	46,34
M10	37,83	39,10	42,01
M11	38,40	39,67	38,19
M12	5,14	9,20	17,92
M13	15,04	7,27	11,36
M14	40,09	33,06	1,51
M15	0,46	0,48	0,43
M16	12,19	6,32	0,62
M17	1,76	3,86	0,93
M18	1,54	0,89	6,52
M19	43,28	39,56	23,59
N 1	75,77	78,14	63,22
N 2	67,75	70,27	57,11
N 3	57,62	59,37	48,41
N 4	50,74	52,39	42,84
N 5	43,20	44,67	36,76
N 6	36,60	37,75	31,07
N 7	30,68	31,69	26,07
N 8	25,31	26,10	21,41
N 9	20,95	21,57	17,78
N10	17,15	17,60	14,50
N11	13,77	14,10	11,67
N12	11,05	11,31	9,35
N13	8,64	8,84	7,27
N14	6,54	6,74	5,48
N15	4,77	4,93	3,98
N16	3,37	3,49	2,80
N17	2,25	2,34	1,95
N18	1,47	1,53	1,29
N19	0,86	0,91	0,77
N20	0,42	0,43	0,41



## LIITE 4. Kodak Q60 CIE L\*a\*b\*-arvot.

	L*	a*	b*				
A 1	28,76	21,86	-38,42	D 7	53,53	29,08	7,71
A 3	28,89	22,08	-38,42	D 8	54,08	15,04	4,18
A 4	29,16	15,82	-26,74	D 9	73,27	23,06	5,93
A 5	29,41	7,14	-12,44	D10	73,82	16,19	4,46
A 6	48,47	17,73	-27,55	D11	73,92	10,39	2,13
A 7	48,82	13,96	-21,26	D12	78,83	-16,92	-12,77
A 8	48,82	8,79	-12,11	D13	76,04	24,02	-11,79
A 9	69,73	11,34	-16,72	D14	87,32	1,03	26,09
A10	69,84	8,58	-10,90	D15	67,24	0,98	-0,05
A11	70,13	6,39	-7,78	D16	74,73	20,96	10,26
A12	90,66	0,88	-0,25	D17	75,95	-17,04	10,10
A13	90,71	0,91	-0,23	D18	68,61	4,66	-20,09
A14	90,61	0,92	0,11	D19	70,04	10,99	20,32
A15	90,61	0,92	0,15	E 1	43,46	45,36	41,28
A16	90,54	0,96	0,05	E 3	34,37	40,26	35,34
A17	90,63	0,94	0,12	E 4	35,15	26,64	23,79
A18	90,66	0,95	-0,16	E 5	34,96	11,96	9,83
A19	34,97	11,89	16,27	E 6	52,95	38,46	33,60
B 1	38,67	47,00	-26,82	E 7	53,98	26,73	22,35
B 3	34,28	43,10	-25,23	E 8	54,02	12,41	9,36
B 4	34,85	28,07	-17,72	E 9	74,03	20,52	16,52
B 5	34,41	12,44	-8,25	E10	74,39	14,21	11,45
B 6	53,37	40,77	-22,67	E11	74,92	8,34	5,34
B 7	53,87	27,18	-17,45	E12	74,71	-21,79	-15,41
B 8	54,65	12,87	-8,21	E13	70,40	31,98	-15,20
B 9	74,02	23,87	-13,56	E14	85,66	3,20	35,73
B10	75,30	16,11	-9,90	E15	58,75	0,57	-0,51
B11	75,35	9,17	-4,18	E16	68,49	27,06	13,52
B12	87,57	-4,58	-3,85	E17	70,03	-21,92	12,54
B13	86,55	8,04	-3,99	E18	60,31	6,58	-24,50
B14	89,80	0,86	7,03	E19	34,84	14,23	13,60
B15	83,27	1,27	0,12	F 1	59,28	30,61	72,36
B16	86,01	6,99	3,65	F 3	33,69	20,53	41,25
B17	86,66	-4,66	3,23	F 4	35,12	13,02	29,08
B18	84,08	1,68	-6,88	F 5	34,84	6,89	14,18
B19	47,18	12,28	17,84	F 6	58,29	27,78	63,62
C 1	43,21	53,12	-8,83	F 7	58,93	19,03	40,98
C 3	34,33	43,31	-6,87	F 8	59,21	6,85	13,38
C 4	34,96	29,30	-4,01	F 9	79,26	12,62	26,37
C 5	34,92	15,08	-2,12	F10	79,58	8,44	17,32
C 6	52,91	46,40	-8,01	F11	79,84	4,38	8,31
C 7	54,18	31,50	-4,58	F12	69,30	-24,75	-19,31
C 8	54,12	15,67	-2,77	F13	64,13	39,09	-18,09
C 9	74,62	23,47	-3,03	F14	84,08	4,94	45,94
C10	74,21	17,65	-3,63	F15	49,89	-0,42	-1,42
C11	75,49	9,94	-1,30	F16	62,19	32,60	17,19
C12	83,52	-10,67	-8,13	F17	63,75	-24,41	15,23
C13	82,02	15,11	-7,58	F18	52,22	8,01	-27,83
C14	88,52	1,26	16,39	F19	46,77	13,98	14,27
C15	75,61	1,17	0,26	G 1	60,71	5,54	75,10
C16	80,64	13,63	7,73	G 3	31,75	5,29	37,64
C17	81,64	-10,77	6,80	G 4	34,34	0,88	28,37
C18	76,80	3,01	-13,49	G 5	34,62	0,45	15,36
C19	59,51	11,69	18,41	G 6	57,47	2,19	62,91
D 1	38,03	51,92	13,55	G 7	58,75	0,31	38,50
D 3	34,30	42,24	11,30	G 8	58,83	0,53	14,25
D 4	35,01	28,69	8,47	G 9	77,74	2,29	47,79
D 5	34,68	15,10	4,07	G10	78,79	2,44	27,91
D 6	53,07	41,15	11,14	G11	79,60	1,66	7,95
				G12	64,17	-29,01	-21,33



LIITE 4. Kodak Q60 CIE L\*a\*b\*-arvot.

G13	58,96	43,54	-19,87
G14	82,28	7,61	54,23
G15	42,79	1,53	-0,02
G16	56,86	37,00	20,33
G17	57,48	-28,35	16,99
G18	44,86	8,69	-31,59
G19	59,08	12,51	15,12
H 1	44,88	-20,73	49,96
H 3	32,49	-14,93	33,70
H 4	33,68	-11,67	24,18
H 5	34,22	-6,31	12,76
H 6	55,95	-18,44	43,91
H 7	57,96	-13,35	28,42
H 8	58,73	-5,54	12,20
H 9	77,98	-10,38	24,61
H10	79,54	-7,32	16,48
H11	79,22	-2,16	7,80
H12	57,93	-31,69	-23,39
H13	53,55	48,69	-20,59
H14	79,26	11,02	61,97
H15	35,08	0,60	-0,16
H16	51,26	40,95	23,97
H17	51,57	-31,47	19,71
H18	37,66	10,24	-34,83
H19	69,78	13,95	17,59
J 1	33,58	-43,46	11,41
J 3	26,55	-30,10	8,12
J 4	27,60	-21,97	6,19
J 5	28,33	-13,06	3,38
J 6	50,24	-34,63	10,27
J 7	52,23	-24,53	6,68
J 8	53,74	-12,29	3,67
J 9	70,71	-22,75	4,78
J10	71,80	-14,68	4,30
J11	72,94	-7,06	1,92
J12	52,78	-34,22	-25,40
J13	48,52	52,83	-21,71
J14	76,76	14,58	70,77
J15	27,53	0,36	0,22
J16	46,18	44,64	28,51
J17	45,63	-34,66	22,31
J18	30,40	12,00	-38,96
J19	34,91	15,11	11,49
K 1	38,44	-40,93	-12,34
K 3	25,95	-30,88	-9,50
K 4	27,40	-23,16	-6,25
K 5	28,31	-13,81	-3,97
K 6	49,64	-36,24	-10,72
K 7	52,13	-26,10	-6,32
K 8	53,27	-12,46	-3,05
K 9	71,58	-23,98	-6,44
K10	72,92	-15,78	-4,58
K11	74,00	-7,98	-2,28
K12	47,81	-36,83	-27,15
K13	43,65	56,05	-22,04
K14	73,91	17,62	77,53
K15	19,58	-0,01	-0,03
K16	41,23	47,77	32,74
K17	39,59	-38,12	24,55
K18	23,05	14,05	-42,04

K19	46,47	14,82	11,73
L 1	35,75	-28,97	-31,53
L 3	26,13	-21,37	-25,92
L 4	27,49	-15,82	-19,59
L 5	28,41	-9,34	-12,17
L 6	49,82	-27,10	-27,93
L 7	52,31	-18,15	-20,68
L 8	53,65	-9,23	-10,38
L 9	70,29	-16,17	-18,73
L10	70,64	-10,98	-12,94
L11	71,75	-5,83	-7,36
L12	42,49	-38,05	-28,93
L13	38,70	59,11	-22,01
L14	71,43	20,11	85,29
L15	11,52	-0,25	-0,58
L16	36,07	50,38	37,18
L17	32,92	-40,13	26,06
L18	15,53	18,02	-45,03
L19	58,98	15,14	12,99
M 1	32,34	-1,91	-36,91
M 3	27,67	-0,31	-35,09
M 4	28,22	0,46	-29,23
M 5	28,94	0,43	-14,77
M 6	47,52	-0,28	-29,80
M 7	48,03	1,14	-23,51
M 8	48,35	1,34	-14,05
M 9	69,04	-0,41	-19,22
M10	68,82	0,43	-14,26
M11	69,23	0,49	-8,53
M12	36,36	-37,57	-30,54
M13	32,41	60,46	-20,34
M14	64,21	27,46	85,27
M15	4,30	-0,22	-1,11
M16	30,20	51,79	40,34
M17	23,19	-37,27	22,57
M18	8,06	22,11	-44,76
M19	69,15	15,81	14,40
N 1	90,84	0,87	0,29
N 2	87,13	-0,01	0,01
N 3	81,50	0,90	-0,18
N 4	77,51	0,60	-0,32
N 5	72,68	0,38	-0,63
N 6	67,84	0,64	-0,60
N 7	63,09	0,44	-0,55
N 8	58,13	0,60	-0,39
N 9	53,57	0,72	-0,57
N10	49,00	0,99	-0,51
N11	44,37	1,12	-0,64
N12	40,10	1,09	-0,55
N13	35,68	1,00	-0,32
N14	31,20	0,46	-0,02
N15	26,53	0,25	0,16
N16	21,89	0,18	0,29
N17	17,20	-0,17	-0,44
N18	12,80	-0,05	-0,65
N19	8,18	-0,52	-0,63
N20	3,92	0,08	-1,74



$$M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0,2231 & 0,1423 & 0,0225 \\ 0,1081 & 0,3053 & -0,0111 \\ -0,0018 & 0,0135 & 0,3140 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} 0,2107 & 0,1355 & 0,0378 & 0,0002 & 0,0000 & -0,0002 \\ 0,0989 & 0,2970 & 0,0029 & 0,0002 & 0,0000 & -0,0001 \\ -0,0049 & 0,0193 & 0,3156 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0001 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 9} = \begin{bmatrix} 0,2382 & 0,1388 & 0,0166 & 0,0011 & -0,0001 & -0,0005 & -0,0005 & -0,0004 & 0,0004 \\ 0,1154 & 0,3053 & -0,0161 & 0,0008 & -0,0002 & -0,0003 & -0,0003 & -0,0004 & 0,0003 \\ -0,0043 & 0,0137 & 0,3245 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0002 & 0,0000 & -0,0001 & -0,0002 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 14} = \begin{bmatrix} -0,3578 & 0,2342 & 0,1445 & 0,0229 & 0,0012 & 0,0000 & -0,0003 & -0,0004 & -0,0007 & 0,0002 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ -0,2727 & 0,1227 & 0,2897 & -0,0117 & 0,0009 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0004 & -0,0004 & 0,0001 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ -0,4504 & 0,0071 & 0,0114 & 0,3282 & 0,0001 & 0,0001 & 0,0004 & -0,0002 & -0,0002 & -0,0004 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$$



$$M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0,3185 & 0,0453 & 0,0277 \\ 0,1654 & 0,2539 & -0,0208 \\ 0,0039 & -0,0148 & 0,3319 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} 0,2974 & 0,0606 & 0,0330 & 0,0001 & 0,0002 & -0,0003 \\ 0,1474 & 0,2605 & -0,0205 & 0,0001 & 0,0002 & -0,0002 \\ -0,0045 & 0,0067 & 0,3150 & -0,0001 & 0,0003 & -0,0001 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 9} = \begin{bmatrix} 0,3341 & 0,0437 & 0,0295 & 0,0016 & 0,0000 & -0,0005 & -0,0009 & -0,0006 & 0,0003 \\ 0,1974 & 0,2352 & -0,0227 & 0,0021 & 0,0000 & -0,0005 & -0,0012 & -0,0008 & 0,0003 \\ 0,0292 & -0,0108 & 0,3160 & 0,0013 & 0,0001 & -0,0001 & -0,0008 & -0,0007 & 0,0001 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 14} = \begin{bmatrix} -0,5837 & 0,2720 & 0,1113 & 0,1026 & 0,0012 & -0,0006 & -0,0017 & 0,0004 & -0,0008 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ -0,6938 & 0,1331 & 0,3065 & 0,0487 & 0,0016 & -0,0008 & -0,0019 & 0,0003 & -0,0009 & 0,0003 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ -0,4822 & -0,0129 & 0,0357 & 0,3740 & 0,0010 & -0,0004 & -0,0010 & 0,0001 & -0,0007 & -0,0001 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$$



$$M_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0,2277 & 0,1438 & -0,0559 \\ 0,0914 & 0,3830 & -0,1505 \\ -0,0539 & -0,0146 & 0,3244 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} 0,1639 & -0,1142 & 0,0431 & 0,0019 & -0,0005 & 0,0002 \\ 0,0613 & 0,0754 & -0,0484 & 0,0020 & -0,0009 & 0,0006 \\ -0,0251 & -0,0632 & 0,1625 & -0,0006 & 0,0009 & 0,0010 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 9} = \begin{bmatrix} 0,1806 & -0,1088 & 0,0477 & 0,0040 & -0,0015 & 0,0046 & -0,0005 & -0,0035 & -0,0017 \\ 0,1017 & 0,0431 & -0,0246 & 0,0043 & -0,0017 & 0,0046 & -0,0009 & -0,0032 & -0,0016 \\ 0,0478 & -0,1284 & 0,1828 & 0,0020 & 0,0003 & 0,0019 & -0,0013 & -0,0016 & -0,0002 \end{bmatrix}$$

$$M_{3 \times 14} = \begin{bmatrix} -3,0651 & 0,1315 & -0,0568 & 0,1964 & 0,0029 & -0,0022 & 0,0030 & 0,0007 & -0,0026 & -0,0023 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ -3,8586 & 0,0437 & 0,2138 & 0,0596 & 0,0042 & -0,0016 & 0,0043 & -0,0004 & -0,0049 & -0,0026 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ -2,2127 & -0,0762 & -0,0544 & 0,2866 & 0,0016 & -0,0004 & 0,0013 & 0,0007 & -0,0017 & -0,0006 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \end{bmatrix}$$



~~TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
TIETOTEKNIIKAN TALON KIRJASTO  
KONEMIEHENITE 2  
02150 ESPOO~~

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Graatisen teknikan  
laboratorio